

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Recuperação de Calor numa Secção de Pintura
para o Processo de Lavagem***

Tese de Mestrado

de

Daniela Filipa Vieira de Sousa

realizado em

Famaval- Criações Metálicas Adauta S.A



Orientador na FEUP: Prof. Fernando Gomes Martins

Orientador na Famaval: Dr. Milton Brandão



Departamento de Engenharia Química

Julho de 2014

Agradecimentos

Gostaria de exprimir algumas palavras de profundo agradecimento e reconhecimento a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão desta etapa da minha vida académica.

À minha *Mãe*, por todos os sacrifícios suportados para que este sonho se concretizasse, pelos valores transmitidos e que contribuíram para a pessoa que sou hoje. Pelas palavras de incentivo, pela paciência e compreensão inestimáveis e por todo o amor demonstrado.

À minha *irmã*, pelo encorajamento e apoio constantes, pela relação de amizade e pelo carinho que sentimos uma pela outra. Ao *André*, meu cunhado, que sempre contribuiu com a sua boa disposição para agradáveis momentos.

À empresa *Galp Energia*, pela oportunidade que me proporcionou através do programa Galp 20-20-20, contribuindo eficazmente para o meu enriquecimento profissional e pessoal. Agradeço ainda todo o financiamento disponibilizado ao longo do desenvolvimento deste projeto.

À empresa *Famaval*, pela oportunidade em realizar a minha Dissertação nas suas instalações.

Ao meu orientador, *Professor Doutor Fernando Martins* por todos os conhecimentos técnicos transmitidos ao longo desta etapa e por todo o empenho e paciência demonstrados. Por toda a sua disponibilidade, apoio prestado e pelo acompanhamento no tratamento de dados.

Ao *Sr. Paulo Sousa*, que sempre me acompanhou durante o tempo que trabalhei na empresa. Pelas condições de trabalho que me proporcionou, pelo tempo disponibilizado ao longo destes meses e por todo o material dispensado para a concretização do projeto. Ao *Sr. Carlos Pinto*, responsável da manutenção, por ter sido tão prestável. Ao *Dr. Milton Brandão* pela simpatia demonstrada e ao restante corpo integrante da empresa.

Ao *Pedro*, amigo e namorado, pelo carinho e apoio demonstrados, pela paciência, pelas palavras e por todos os momentos partilhados.

Aos meus *amigos de sempre*, que fora das horas de trabalho contribuíram com momentos de alegria para que dessa forma esta etapa fosse superada mais facilmente. Muito obrigado por estarem sempre por perto.

Aos *amigos que fiz na faculdade*, por me acompanharem durante todo o meu percurso académico, por toda a força que me deram, por todos os bons momentos vividos e que jamais poderão ser esquecidos. Que sejam amigas para a vida.

A *todos os meus familiares*, que sempre incentivaram o meu sucesso académico.

Resumo

Atualmente, a energia apresenta uma enorme importância na economia e as indústrias são quem mais a utiliza nos processos de produção. Uma vez que o preço dos combustíveis fósseis está cada vez mais elevado e as alterações climáticas são mais acentuadas, torna-se necessário estudar alternativas que permitam melhorar a eficiência energética dos processos. O presente projeto foi desenvolvido na empresa Famaval, no âmbito do programa Galp 20-20-20, promovido pela Galp Energia e o objetivo principal relaciona-se com o estudo de soluções que permitam recuperar o calor desperdiçado numa das secções de pintura da empresa para aquecer a água utilizada durante o processo de tratamento da superfície metálica antes da pintura.

A concretização deste trabalho necessitou de um levantamento de informação junto da empresa, bem como a execução de medições durante determinados períodos, de forma a ser possível quantificar dados essenciais ao projeto que permitissem caracterizar o processo em estudo.

Desenvolveram-se três estudos diferentes. O estudo I visa a recuperação de calor a partir dos gases de combustão de um queimador da estufa, o estudo II pretende recuperar o calor do ar quente proveniente da conduta de exaustão da estufa e o estudo III pretende recuperar o calor excedentário a partir dos gases de combustão de um queimador e do ar quente da conduta de exaustão da estufa.

Dimensionaram-se diferentes permutadores de calor, que permitissem aquecer a água do processo no tanque de pré-desengorduramento até uma temperatura de, aproximadamente, 50 °C, reaproveitando o calor nos três estudos anteriormente referidos.

Para os três estudos, a poupança anual no consumo de gás natural foi de 5400 m³N, 3940 m³N e 8180 m³N, respetivamente.

O projeto mencionado, de acordo com o estudo III que é o que apresenta melhorias mais significativas, terá um investimento total de, aproximadamente, 4450 € e apresenta um período de retorno de 1 ano.

Como conclusão, comprova-se que este projeto permite uma redução do consumo de gás natural na empresa, aumentando a eficiência energética na mesma.

Palavras Chave: Eficiência Energética, Recuperação de calor, Permutador de Calor.

Abstract

Currently, the energy has a high importance in the economy and industries are using it intensively. Once the price of fossil fuels is increasingly high and climate change is more pronounced, it becomes necessary to study alternatives to improve the processes' energy efficiency.

This project was developed in Famaval as part of the Galp 20-20-20 program, sponsored by Galp Energia. The main aim of this project consists in finding solutions that allow the recovery of waste heat in the painting section for heating water used in the treatment of metal surfaces before painting.

The development of this work required a survey of information from the company, as well as the realization of measurements during certain periods of time. This information was essential to characterize the process.

Three different studies are developed. The *study I* aimed to recover heat from exhausted gases of a burner at a drying oven, the *study II* considers the hot air from exhaust duct of the drying oven and finally the *study III* combined the former two studies.

Different heat exchangers were designed allowing for transferring heat to process water in the pre-degreasing tank to a temperature of 50 °C.

For the three studies, the annual savings in the consumption of natural gas were 5400 m³N, 3940 m³N and 8180 m³N, respectively.

The *study III*, that is the one with the most significant improvements, will have a total investment of approximately 4450 € and the payback period is about 1 year.

In conclusion, this project shows that is possible to increase the energy efficiency in Famaval.

Keywords: Energy Efficiency, Heat recovery, Heat exchanger.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Porto, 04 de Julho de 2014

(Daniela Filipa Vieira de Sousa)

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.2.1	Caracterização das instalações	3
1.2.2	Processo Produtivo.....	4
1.2.3	Combustível utilizado pela Famaval	4
1.3	Contributos do Trabalho	6
1.4	Organização da Tese	6
2	Contexto e Estado da Arte	7
3	Descrição Técnica.....	9
3.1	Descrição Processual da Secção de Pintura nº3.....	9
4	Trabalho Realizado	15
4.1	Análise dos queimadores	15
4.1.1	Queimador de PD.....	15
4.1.2	Queimador de D	17
4.1.3	Queimador G_1	18
4.1.4	Queimador G_2	19
4.2	Quantificação dos níveis de água	20
4.2.1	Tanque de PD	20
4.2.2	Tanque de D.....	21
4.2.3	Tanque de L_1	21
4.2.4	Tanque de L_2	22
4.2.5	Tanque de LD	23
4.3	Outras medições efetuadas	23
5	Principais Resultados.....	26
6	Permutadores de Calor de Calor	40
6.1	Dimensionamento dos Permutadores de Calor	40

7	Avaliação Económica	42
8	Conclusões	45
8.1	Objetivos Realizados	45
8.2	Limitações e Trabalho Futuro	45
9	Referências Bibliográficas	46
Anexo A	Registo de medições	47
Anexo B	Balanço de energia ao tanque de pré-desengorduramento	56
Anexo C	Valores obtidos a partir de cálculos	57
Anexo D	Custos de Equipamento	64
Anexo E	Análise Económica	65

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Vista panorâmica da FamaVal</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2: Organização espacial do edifício principal da unidade industrial</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3: Cenário evolutivo do número de importações e exportações desde janeiro de 2013 até janeiro de 2014</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4: Início do tratamento de superfície.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5: Tanques da zona de desengorduramento.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6: Tanques da zona de lavagem.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7: Tratamento de superfície</i>	<i>11</i>
<i>Figura 8: Diagrama processual do túnel de tratamento de superfície</i>	<i>12</i>
<i>Figura 9: Secagem</i>	<i>13</i>
<i>Figura 10: Túnel de polimerização.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11: Consumo de gás natural na secção de pintura nº3 durante o ano de 2013</i>	<i>14</i>
<i>Figura 12: Temperatura vs tempo para o queimador PD</i>	<i>16</i>
<i>Figura 13: Temperatura vs tempo durante o funcionamento do queimador PD</i>	<i>17</i>
<i>Figura 14: Temperatura vs tempo para o queimador D.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 15: Temperatura vs tempo para o queimador G_1</i>	<i>19</i>
<i>Figura 16: Temperatura vs tempo para o queimador G_2</i>	<i>19</i>
<i>Figura 17: Nível de água vs tempo para o tanque de PD</i>	<i>20</i>
<i>Figura 18: Nível de água vs tempo para o tanque de D.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 19: Nível de água vs tempo para o tanque de L_1</i>	<i>22</i>
<i>Figura 20: Nível de água vs tempo para o tanque de L_2</i>	<i>22</i>
<i>Figura 21: Nível de água vs tempo para o tanque de LD</i>	<i>23</i>
<i>Figura 22: Entrada da água projetada sobre os discos no tanque de PD</i>	<i>25</i>
<i>Figura 23: Condutas de saída de gases e ar quente do túnel de secagem e da estufa.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 24: Janela da função do MS Excel utilizada.....</i>	<i>31</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1: Composição média do gás natural utilizado pela FamaVal em 2013</i>	<i>5</i>
<i>Tabela 2: Propriedades do gás natural utilizado pela FamaVal em 2013</i>	<i>5</i>
<i>Tabela 3: Temperatura dos gases de combustão para os diferentes queimadores</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 4: Volume desperdiçado na passagem da zona de pré-desengorduramento para a zona de desengorduramento</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 5: Temperaturas da água no tanque de PD e da água que regressa ao tanque após a lavagem</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 6: Temperaturas à saída de cada conduta.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 7: Composição padrão do ar, em volume</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 8: Quantidade de reagentes e produtos da combustão</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 9: Modulação dos queimadores</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 10: Caudal de gás natural</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 11: Dados utilizados no processo iterativo</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 12: Tempo atual de funcionamento do queimador PD e consumo atual de gás natural no dia 13/03.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 13: Consumo diário, mensal e anual de gás natural, sem permutador de calor</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 14: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural após adição de um permutador de calor no dia 13/03 (estudo I).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 15: Poupança no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural no dia 13/03 (estudo I).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 16: Poupanças diária, mensal e anual de gás natural, com permutador de calor (estudo I).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 17: Calor transferido e caudal volúmico de água para cada cenário (estudo II)</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 18: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural após adição de um permutador de calor no dia 13/03 (estudo II).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 19: Poupança no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural no dia 13/03 (estudo II).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 20: Poupanças diária, mensal e anual de gás natural, com permutador de calor (estudo II)</i>	<i>36</i>

<i>Tabela 21: Calor transferido e caudal volúmico de água para cada cenário (estudo III)</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 22: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural após adição de um permutador de calor no dia 13/03 (estudo III).....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 23: Poupança no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural no dia 13/03 (estudo III)</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 24: Poupanças diária, mensal e anual de gás natural, com permutador de calor (estudo III)</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 25: Parâmetros assumidos na caracterização da tubagem.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 26: Área de transferência e comprimento do tubo para cada um dos estudos.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 27: Custo diário, mensal e anual do gás natural, sem permutador de calor</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 28: Poupanças diária, mensal e anual obtidas após introdução de permutadores de calor em cada um dos estudos</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 29: Custo dos permutadores de calor e custo de investimento</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 30: Período de retorno para cada um dos estudos apresentados</i>	<i>44</i>

Notação e Glossário

$C_{p_{gc}}$	Capacidade calorífica específica dos gases de combustão	$\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$
$C_{p_{ar}}$	Capacidade calorífica específica do ar	$\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$
$C_{p_{mistura}}$	Capacidade calorífica específica da mistura de gases de combustão com ar	$\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$
PCI	Poder Calorífico Inferior do gás natural	$\text{kcal} \cdot \text{m}^3 \text{N}^{-1}$
PCS	Poder Calorífico Superior do gás natural	$\text{kcal} \cdot \text{m}^3 \text{N}^{-1}$
T_{gc}	Temperatura dos gases de combustão	$^\circ \text{C}$
V_{PD-D}	Volume de água desperdiçado na passagem da zona PD para D	ml
$T_{\text{água}}$	Temperatura da água no tanque de PD	$^\circ \text{C}$
T_{retorno}	Temperatura da água que volta a entrar no tanque de PD após a lavagem	$^\circ \text{C}$
$Q_{\text{gás}}$	Caudal de gás natural	$\text{m}^3 \text{N} \cdot \text{h}^{-1}$
$P_{\text{queimador}}$	Potência do queimador	$\text{kcal} \cdot \text{h}^{-1}$
Q_{bombaT}	Caudal debitado pela bomba	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
\dot{v}_a	Caudal volúmico de água retirado ao tanque para passar no permutador	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
\dot{v}_{gc}	Caudal volúmico de gases de combustão	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
\dot{v}_{ar}	Caudal volúmico de ar quente proveniente da conduta de exaustão da estufa	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
\dot{v}_{mistura}	Caudal volúmico da mistura de gases de combustão com o ar quente da estufa	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
T_i	Temperatura inicial de água no tanque	$^\circ \text{C}$
T_f	Temperatura final de água no tanque	$^\circ \text{C}$
A	Área do permutador	m^2
$C_{\text{permutador}}$	Custo do permutador de calor	€
$C_{\text{investimento}}$	Custo de investimento	€

Letras gregas

$\rho_{\text{água}}$	Densidade da água	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_{ar}	Densidade do ar	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
η	Eficiência do queimador	%

Lista de Siglas

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
S.A.	Sociedade Anónima
GEE	Gases de Efeito de Estufa
ADENE	Agência para a Energia
M€	Milhões de euros
ANEME	Associação Nacional das Empresas Metalúrgicas e Eletromecânicas
A.L.C.	Altura Largura Comprimento
PD	Pré-desengorduramento
D	Desengorduramento
L ₁	Zona de lavagem industrial nº1
L ₂	Zona de lavagem industrial nº2
LD	Zona de lavagem com água desmineralizada
G ₁	Grupo 1
G ₂	Grupo 2

1 Introdução

O consumo de energia aumentou de forma substancial durante o século XX. Desde a Revolução Industrial que a procura de recursos energéticos tem vindo a alargar, prevendo-se uma continuidade desta tendência com o crescimento da Indústria [1].

A energia é essencial para assegurar o desenvolvimento de um país, tanto a nível económico como social. Como tal, e considerando a indústria um dos setores que mais consome energia, torna-se imprescindível analisar o desempenho das ferramentas existentes e desenvolver novas tecnologias que permitam controlar o consumo de energia e/ou reaproveitar a energia desperdiçada numa indústria. Desta forma, será ainda possível controlar e reduzir as emissões de gases de efeito de estufa (GEE) [1].

Um dos processos mais utilizados na obtenção de energia é a queima de combustíveis fósseis. Contudo, devido a uma maior consciencialização da eventual escassez dos recursos fósseis, essencialmente do petróleo, aliada ao elevado preço do mesmo e à necessidade de reduzir as emissões de GEE, prevê-se que uma fração crescente das necessidades energéticas seja satisfeita recorrendo a fontes de energia renovável [2].

Os processos de combustão continuarão a ser essenciais para assegurar a procura de energia a um ritmo semelhante ao do desenvolvimento mundial. No entanto, é necessário compreender bem estes processos, de forma a ser possível atingir elevadas eficiências de combustão, sem comprometer a segurança, fiabilidade e tempo de vida útil dos equipamentos [1].

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

A globalização da economia e a necessidade de um desenvolvimento sustentável faz com que as indústrias se adaptem de forma a responder aos padrões de qualidade exigidos, contribuindo para a elevada competitividade entre as empresas que pretendem manter-se líderes no mercado. Em consequência das atuais ações relacionadas com a eficiência energética que têm sido feitas junto das mesmas, existe uma maior consciencialização acerca dos impactos que uma boa gestão de energia por parte da empresa pode causar, tanto a nível económico como ambiental [3].

Desta forma, as empresas em busca de certificação adequada cumprem exigências para o desenvolvimento, implementação e manutenção de sistemas de gestão de energia.

A Famaval- Criações Metálicas Adauta S.A. é uma empresa do setor metalomecânico pioneira na implementação da ISO 50001 em Portugal (Sistemas de Gestão de Energia - requisitos e orientações para utilização). Apesar de possuir esta certificação, a empresa procura uma melhoria contínua no desempenho da produção dos seus produtos, procurando sempre

alternativas que permitam, através de uma boa gestão de energia atingir resultados cada vez mais benéficos a nível de eficiência energética.

No contacto com a Famaval, foi possível perceber que o consumo de combustível representa um custo elevado, surgindo a necessidade de poupar energia no aquecimento de água utilizada no processo de pré-desengorduramento e fosfatação aplicado nos produtos a pintar. O aumento do preço dos combustíveis reflete-se no custo total de produção e a diferença entre a poupança e o desperdício de combustível pode determinar a diferença entre lucros e prejuízos que a empresa pode ter. Aliada à poupança de combustível, pretende reduzir-se as emissões de GEE para a atmosfera.

Foi necessário perceber o funcionamento dos equipamentos e processos da empresa, de forma a ser possível compreender como se desenvolve a produção dos seus produtos.

Este projeto tem como principal objetivo recuperar o calor existente na secção de pintura nº 3 da Famaval para aquecer água de lavagem utilizada na zona de tratamento de superfície. Foi preciso efetuar um estudo detalhado do funcionamento desta secção, analisando e compreendendo os equipamentos instalados, visando otimizar os seus consumos energéticos e respeitando os requisitos ambientais.

O estudo de otimização foi efetuado nos queimadores existentes nesta secção da indústria e nas condutas de saída de ar quente. O início deste estudo teve como base a caracterização da combustão praticada em cada queimador e a análise detalhada das características de funcionamento dos queimadores. Das medições efetuadas obtiveram-se valores necessários para o cálculo do consumo específico de combustível em cada queimador, quantificaram-se os caudais de água em cada tanque, determinaram-se os caudais de gases à saída dos queimadores e a quantidade de ar quente na saída de uma conduta, procedendo-se em seguida à otimização. Esta otimização consistiu na realização de três diferentes estudos, nos quais se desenvolveram cenários de operação, que permitiram obter reduções nos consumos energéticos da empresa.

1.2 Apresentação da Empresa

A Famaval- Criações Metálicas Adauta, S.A. é uma empresa situada na cidade de Vale de Cambra. Foi fundada a 19 de março de 1964 e tem como principal atividade a fabricação de antenas parabólicas e acessórios de fixação de elevada qualidade.

Produz diversos tipos de antenas parabólicas do mercado, fabricando mais de 60 modelos diferentes, divididos por 16 diâmetros compreendidos entre 0,45-3,10 m.

Atualmente, a empresa possui cerca de 180 colaboradores e tem uma área total de 10000 m². A sua capacidade de produção instalada é de 6 milhões de antenas por ano.

Em relação à implementação de Sistemas da Qualidade na Famaval, esta encontra-se certificada pela ISO 9001-Sistemas de Gestão da Qualidade e pela ISO 50001-Sistema de Gestão de Energia, através da multinacional alemã TÜV Rheinland Group.

A empresa pretende expandir-se e, presentemente, já conta com 2 filiais no Brasil, uma em Itajaí, no estado de Santa Catarina e outra em Santos, no estado de São Paulo [4].



Figura 1: Vista panorâmica da Famaval.

1.2.1 Caracterização das instalações

As instalações da Famaval encontram-se divididas por vários setores, todos eles diferentes, consoante a sua utilização. A Figura 2 apresenta a localização de cada um dos setores da unidade industrial [5].

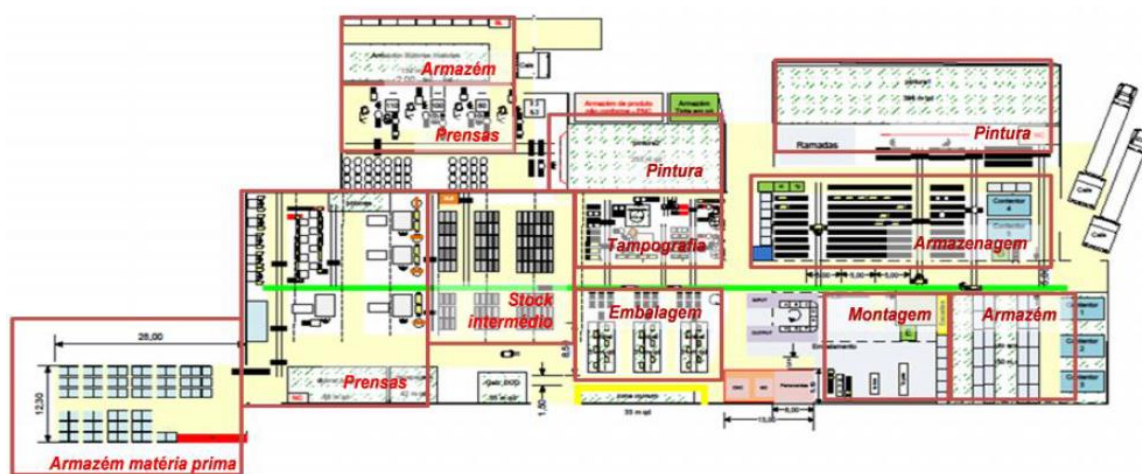


Figura 2: Organização espacial do edifício principal da unidade industrial.

1.2.2 Processo produtivo

A produção dos discos tem início no sector das prensas, zona na qual estão inseridas as prensas mecânicas e hidráulicas. A chapa é adquirida e formatada consoante os discos que se pretendem produzir.

Na zona da soldadura, produzem-se as estruturas e as copas de maiores dimensões.

Na zona da serralharia fabricam-se alguns dos acessórios metálicos para as antenas parabólicas, que permitem a construção de parte da estrutura da antena.

Alguns dos modelos de discos passam por um processo de rebarbagem, de forma a remover as rebarbas resultantes dos processos mecânicos anteriores, mas sem afetar a dimensão e a forma da peça.

Algumas das estruturas após passarem a fase da soldadura não precisam de ser pintadas, sofrendo um processo de galvanização, no qual estas são revestidas por um metal que tem a função de as proteger de fenómenos de corrosão, antes de seguirem para o embalamento. As estruturas de grandes dimensões, antes de seguirem para a zona de pintura, passam por um processo de decapagem, de forma a remover impurezas inorgânicas das superfícies metálicas. Após estas etapas, os discos e estruturas são encaminhadas para as zonas de pintura: zona de pintura nº1 (acessórios e discos de pequenas dimensões), zona de pintura nº2 (discos e acessórios de grandes dimensões) e zona de pintura nº3 (discos de pequenas dimensões). Aqui, passam por processos de pré-desengorduramento/ fosfatação e desengorduramento/ fosfatação, onde são retiradas as gorduras e impurezas contidas nas mesmas, seguindo-se um processo de secagem e um processo de polimerização. Será sobre a zona de pintura nº3 que este projeto se focará.

Na tampografia/serigrafia, as peças são impressas com os logótipos ou frases indicadas pelos clientes e ficam prontas a serem distribuídas.

No ensacamento embalam-se as sacas que contêm os acessórios necessários à montagem das antenas (parafusos, anilhas, grampos e peças plásticas).

1.2.3 Combustível utilizado pela Famaval

A Famaval utiliza o gás natural como principal combustível. A previsão é de que, durante muitos anos, os combustíveis gasosos continuarão a ter um papel importante na área da combustão devido a serem um combustível mais ecológico quando comparado com os combustíveis fósseis tradicionais [1].

O gás natural é constituído por uma mistura de hidrocarbonetos leves e pequenas quantidades de inertes e permanece no estado gasoso à temperatura ambiente e pressão atmosférica. Este é um gás inodoro, incolor, não apresenta toxicidade e é mais leve que o ar. O principal hidrocarboneto que o constitui é o metano, sendo que o etano, o propano, o butano e o pentano existem em menores quantidades. Os inertes típicos das jazidas deste gás são o

dióxido de carbono, o hélio, o sulfureto de hidrogénio e o azoto molecular. As quantidades de água e compostos de enxofre e de azoto presentes no gás natural podem ser consideradas desprezáveis [1].

A Famaval é abastecida pela Galp e o gás distribuído por esta entidade provém de duas origens distintas: da Argélia sob a forma de gás natural através de gasodutos, e da Nigéria, liquefeito e transportado por embarcações [6].

A Tabela 1 apresenta a composição média do gás natural utilizado pela Famaval no ano de 2013 e a Tabela 2 as respetivas propriedades.

Tabela 1: Composição média do gás natural utilizado pela Famaval em 2013 (Fonte: Dados fornecidos pela Galp Energia)

Nomenclatura	Fórmula química	% (v/v)
Metano	CH ₄	88,231
Etano	C ₂ H ₆	7,879
Propano	C ₃ H ₈	1,343
I-butano	C ₄ H ₁₀	0,126
n-butano	C ₄ H ₁₀	0,144
I-pentano	C ₅ H ₁₂	0,020
n-pentano	C ₅ H ₁₂	0,015
n-hexano	C ⁶⁺	0,009
Azoto	N ₂	0,981
Dióxido de carbono	CO ₂	1,249

Tabela 2: Propriedades do gás natural utilizado pela Famaval em 2013 (Fonte: Dados fornecidos pela Galp Energia)

Densidade relativa	0,6276	
Massa volúmica (PTN, kg·m ⁻³)	0,8114	
	kWh·m ³ N ⁻¹	kcal·m ³ N ⁻¹
PCI	10,652	9159,229
PCS	11,786	10133,97

1.3 Contributos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo recuperar o calor desperdiçado na secção de pintura nº3 para aquecer a água existente no tanque de pré-desengorduramento utilizada na lavagem dos discos no túnel de tratamento de superfície.

Perseguindo este objetivo foram realizados três estudos diferentes, de forma a encontrar aquele que permite obter soluções energeticamente mais eficientes. Desta forma pretende reduzir-se o consumo de gás natural bem como os custos associados à sua utilização diminuindo o tempo que o queimador da zona de pré-desengorduramento (PD) está ligado para aquecimento da água de lavagem.

Em consequência, poder-se-á reduzir as emissões de GEE para o meio-ambiente, contribuindo para uma diminuição do consumo total de energia da empresa, que anualmente se encontra acima dos 500 tep (toneladas equivalentes de petróleo).

1.4 Organização da Tese

Esta dissertação encontra-se dividida em 9 capítulos.

No Capítulo 1 é feita uma introdução ao projeto, apresentando uma descrição global do problema em estudo. Faz-se uma breve apresentação da empresa onde o projeto foi desenvolvido e apresentam-se o objetivo e os contributos do trabalho.

No Capítulo 2 faz-se um enquadramento geral da indústria metalomecânica em Portugal e uma breve introdução ao fenómeno de combustão e processos de recuperação de calor.

No Capítulo 3 é feita uma descrição detalhada do processo na secção de Pintura nº3.

No Capítulo 4 são apresentadas as quantificações realizadas para que o projeto fosse desenvolvido. A análise aos queimadores, a quantificação dos níveis de água e as medições de temperaturas foram efetuadas durante o mês de março. Neste capítulo é mencionado o trabalho realizado no desenvolvimento do projeto.

No Capítulo 5 apresentam-se as diferentes alternativas estudadas para alcançar resultados. Todos os principais resultados obtidos estão apresentados neste capítulo.

No Capítulo 6 são apresentados os cálculos efetuados para obter os permutadores de calor adequados ao processo, para cada um dos estudos efetuados.

No Capítulo 7 é feita uma avaliação económica do projeto. Apresentam-se as poupanças conseguidas com este e é feita uma análise do investimento que é necessário realizar para implementação do mesmo, verificando a sua viabilidade.

No Capítulo 8 são redigidas as conclusões do trabalho. Apresentam-se ainda as limitações do projeto bem como uma proposta de trabalho futuro.

2 Contexto e Estado da Arte

A indústria metalomecânica tem-se afirmado como um setor fundamental para a economia. O peso desta na indústria transformadora em Portugal é de 23% quanto ao número de empresas e de 26% quanto ao volume de negócios. Ocupa uma posição chave na cadeia de produção e a partir da mesma são criados e gerados produtos finais e matérias-primas que se revelam de utilização importante noutros diferentes setores industriais [7].

Em Portugal, durante o mês de janeiro de 2014, as exportações de produtos oriundos das indústrias metalomecânicas aumentaram 9,7% e as importações diminuíram 7,6%, quando comparados com valores de dezembro do ano anterior. Este aumento no número de exportações contribuiu para uma redução do défice da balança comercial de cerca de 183 M€ [8].

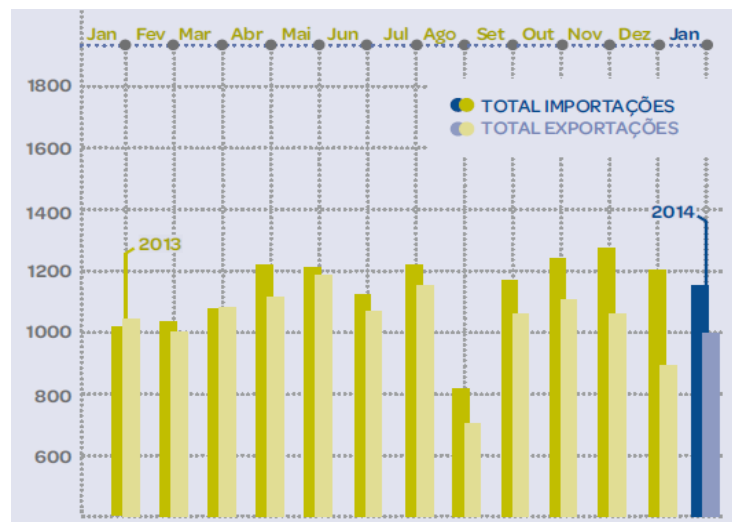


Figura 3: Cenário evolutivo do número de importações e exportações desde janeiro de 2013 até janeiro de 2014
(Fonte: ANEME, 2014)

Na indústria metalomecânica, um aumento da eficiência energética pode efetuar-se através da recuperação de calor, a qual permite reduzir custos e aumentar a rentabilidade e competitividade. As tecnologias mais analisadas estão relacionadas com a recuperação de calor a partir dos gases de exaustão e a recuperação de calor a partir da água [9].

Devido às elevadas temperaturas envolvidas nos vários processos metalomecânicos, as hipóteses de utilizar o calor excedentário é, provavelmente, mais importante do que em qualquer outra indústria. Elevadas quantidades de gases de exaustão deixam a câmara de combustão e a recuperação da maior parte do calor dos mesmos é um assunto de elevada importância para assegurar a eficiência do processo [10].

Os gases de exaustão são resultantes do processo de combustão que ocorre para aquecer água

dos tanques na zona de tratamento de superfície. Estes saem da câmara para a atmosfera, por intermédio de uma chaminé e são utilizados ventiladores para aumentar o fluxo de saída dos gases [1,10].

De forma sucinta, Liñán e Williams (1993) definiram combustão como “a ciência das reações químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa” [1].

A combustão é claramente responsável pelo reforço dos GEE presentes na atmosfera. Assim sendo, diminuindo a quantidade de gases que é expelida para o meio-ambiente a partir deste fenómeno, é possível atenuar os efeitos do aquecimento global que se faz sentir no planeta [11].

De acordo com Reay (1979), o potencial de recuperação de calor a partir dos gases quentes de exaustão é bastante significativo [9].

Neste projeto aplicar-se-á a recuperação de calor em três estudos diferentes. O estudo I pretende recuperar calor a partir dos gases de combustão, o estudo II a partir do ar quente proveniente do processo industrial e o estudo III junta os dois primeiros estudos num só. A recuperação de calor tem inúmeras vantagens, pois permite reduzir o consumo de combustíveis fósseis utilizados e, como consequência permite uma redução de gases poluentes para a atmosfera.

A utilização de permutadores de calor revela-se um investimento com um período de retorno relativamente pequeno, traduzindo-se numa redução dos custos de produção [7].

3 Descrição Técnica

3.1 Descrição processual da secção de pintura nº3 [12]

Os discos, após serem moldados, necessitam de passar por um processo de desengorduramento e fosfatação, para serem retiradas as gorduras acumuladas nas suas superfícies metálicas e por um processo de fosfatação, para que estas superfícies sejam preparadas para a pintura.

Na secção de pintura nº3, os discos são colocados, de forma manual, num transportador que funciona a uma velocidade variável, consoante o tipo de disco que se está a pintar e dão entrada no túnel de tratamento de superfície. Os discos que se pintam em maiores quantidades são as que apresentam as dimensões de $0,675 \times 0,625$ m (ver Figura 4 a) e b)) e a velocidade do transportador varia entre $4,8 - 5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Este túnel, com um comprimento de 41,6 m e apresenta 5 estágios diferentes: pré-desengorduramento/fosfatação (PD), desengorduramento/fosfatação (D), lavagem industrial nº1 (L_1), lavagem nº2 (L_2) e lavagem com água desmineralizada (LD).

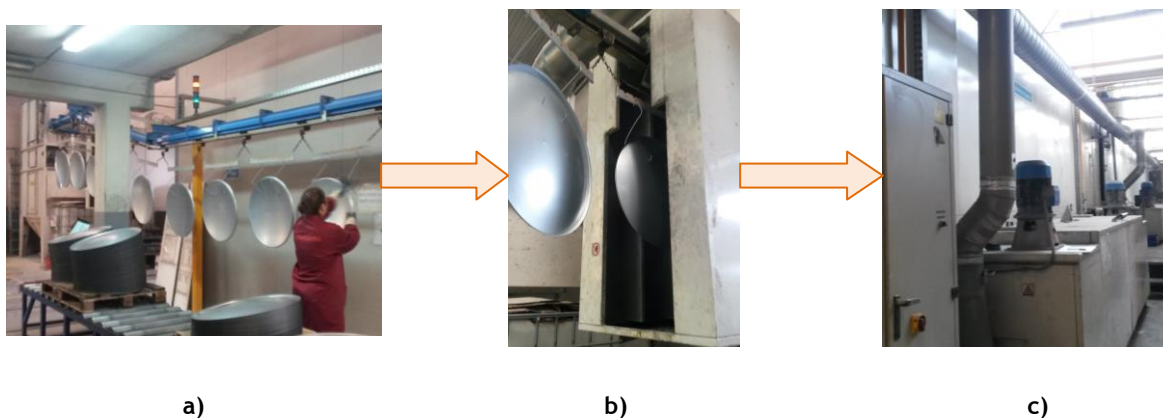


Figura 4: Início do tratamento de superfície: a) Colocação dos discos no transportador; b) Entrada no túnel de tratamento de superfície; c) túnel de tratamento de superfície.

A zona de pré-desengorduramento (PD) e fosfatação apresenta como dimensões úteis de trabalho $1,1 \times 0,5 \times 7,5$ m (A.L.C) e possui um tanque com uma capacidade de 6500 litros, no qual a temperatura da água varia entre os 45°C e os 50°C . O aquecimento da água efetua-se a partir de um permutador de calor que se encontra equipado com um queimador automático a gás (queimador PD) e apresenta uma potência de $378400 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$. Nesta zona do túnel existem 242 bicos que permitem a projeção da água de lavagem sobre o material.

A zona de desgorduramento (D) e fosfatação apresenta $1,1 \times 0,5 \times 10$ m (A.L.C.) como dimensões úteis de trabalho e um tanque com uma capacidade de 9000 litros. No tanque a temperatura da água varia entre os 39°C e os 45°C e o aquecimento desta é efetuado a partir de um permutador de calor, equipado com um queimador automático a gás (queimador D) com uma potência de $498800 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$. Esta zona do túnel possui 330 bicos que permitem a projeção da água de lavagem sobre os discos.

A bombagem de líquido do tanque para o interior do túnel, nas zonas de PD e D, ocorre através de 4 bombas centrífugas verticais, 2 em cada tanque, que debitam até $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de água no máximo, cada uma. A maioria da água projetada volta a entrar nos tanques permitindo manter os níveis de água dos mesmos relativamente constantes. Este processo de desgorduramento ocorre por ação de um desgordurante, o qual permite retirar as gorduras acumuladas na superfície dos discos. O processo de fosfatação atua nos discos formando uma película na superfície das mesmas que serve como um revestimento, conferindo-lhes uma maior aderência à tinta no posterior processo de pintura e uma maior proteção contra fenómenos de corrosão.

Tanto no tanque de PD como D a temperatura máxima que a água poderá atingir é de 60°C .

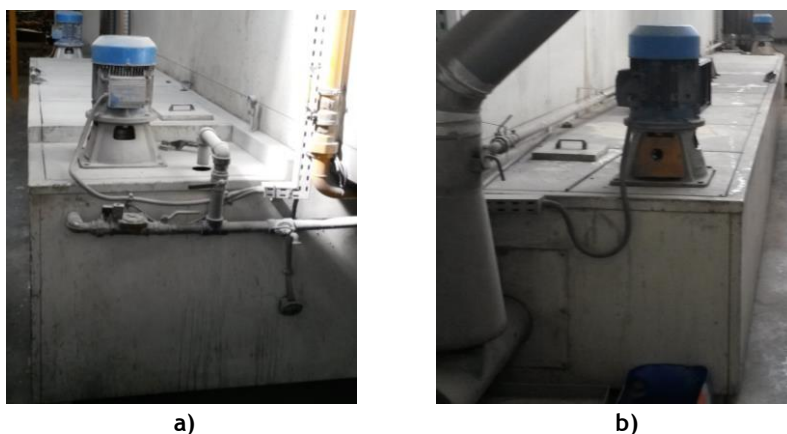


Figura 5: Tanques da zona de desgorduramento: a) Pré-desgorduramento; b) Desgorduramento.

A zona de lavagem industrial nº1 apresenta as dimensões úteis de trabalho de $1,1 \times 0,5 \times 3,75$ m (A.L.C.), um tanque com capacidade para 2000 litros e 110 bicos que permitem a projeção da água sobre o material.

Com $1,1 \times 0,5 \times 4,34$ m (A.L.C.) de dimensões úteis de trabalho, a zona de lavagem nº2 possui 132 bicos para projetar a água sobre os discos e um tanque com 3000 litros de capacidade. Em ambas as zonas a bombagem do líquido é efetuada a partir de uma bomba vertical existente em cada um dos tanques que debita $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

As zonas L_1 e L_2 permitem a lavagem dos discos à temperatura ambiente, por forma a retirar resíduos dos químicos utilizados nas zonas de PD e D.

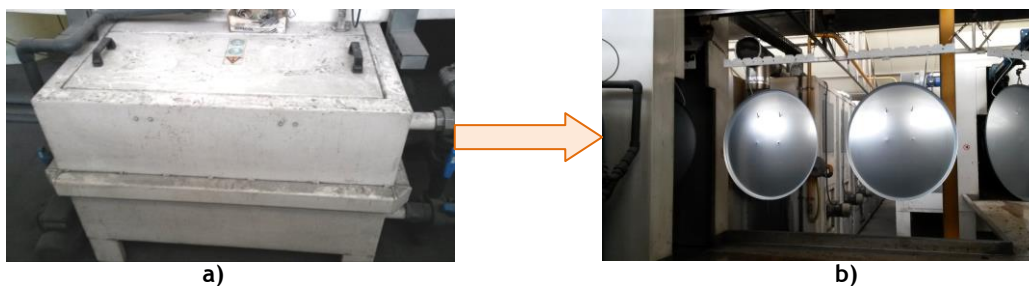


a)

b)

Figura 6: Tanques da zona de lavagem: a) L₁; b) L₂.

A zona de lavagem com água desmineralizada permite retirar alguns minerais que se encontram acumulados nos discos. Possui 1,1×0,5×1,375 m (A.L.C.) de dimensões úteis de trabalho e um tanque com uma capacidade de 1000 litros. Apresenta ainda 33 bicos que projetam a água sobre o material e que é bombeada a partir de uma bomba centrífuga horizontal que debita 8 m³·h⁻¹. A capacidade da desmineralização pode ir até aos 7000 litros por hora.



a)

b)

Figura 7: Tratamento de superfície: a) Tanque de LD; b) Saída do túnel de tratamento de superfície.

A água que se perde na lavagem dos discos é direcionada para uma pequena ETAR existente na Famaval, onde é tratada para posterior introdução num colector pertencente à Câmara Municipal da região.

Com exceção da água do tanque de LD, que provém da rede pública, a água abastecida aos tanques de PD, D, L₁ e L₂ é proveniente de outra rede de abastecimento que a empresa possui. No entanto, quando o nível de água no tanque de PD atinge valores abaixo do limite estabelecido, a água reposta é oriunda do tanque de D e, quando o nível de água no tanque de D é inferior ao limite estabelecido, é retirada água ao tanque de L₁. Esta reposição ocorre a partir da abertura de eletroválvulas que existem em cada um dos tanques. Cerca de uma vez por mês realiza-se a mudança de água dos tanques de PD e D e efetua-se a sua lavagem.

Por forma a facilitar a compreensão do processo de lavagem, construiu-se o diagrama processual apresentado na Figura 8.

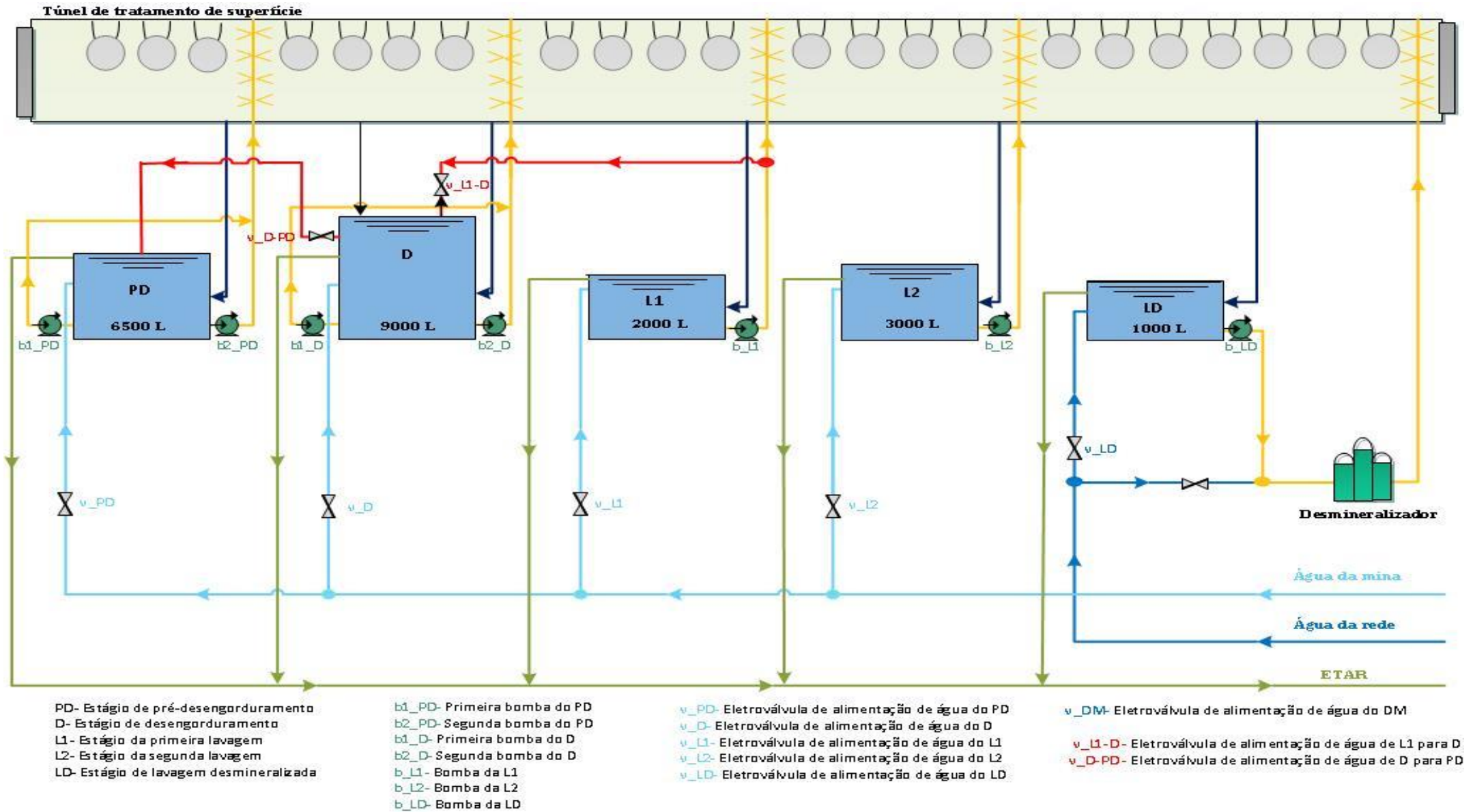


Figura 8: Diagrama processual do túnel de tratamento de superfície

Após a lavagem os discos entram de forma contínua no túnel de secagem de humidades. Este túnel apresenta um comprimento total de 15,45 m, umas dimensões úteis de trabalho de 1,1×0,5×34 m (A.L.C.) e os discos efetuam um trajeto em forma de 'S'. Possui dois queimadores que funcionam a partir da queima direta do combustível e apresentam uma potência de 215000 kcal·h⁻¹, cada um. Cada um dos 9 ventiladores centrífugos existentes no túnel é responsável pela recirculação de 3000 m³·h⁻¹ de ar.

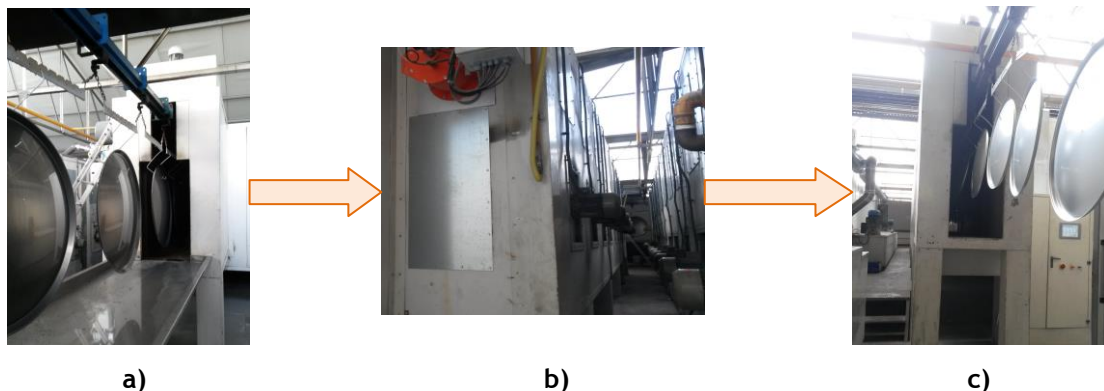


Figura 9: Secagem: a) Entrada no túnel de secagem; b) Túnel de secagem; c) Saída do túnel de secagem

Na fase seguinte, os discos entram na cabine de pintura, na qual existe uma central de alimentação onde é colocada a tinta sobre a forma de pó que depois de fluidificado é transportado até às pistolas e aplicado sobre as peças.

O processo seguinte é a polimerização da tinta e os discos dão entrada no túnel de polimerização/estufa. Aqui ocorre a secagem da tinta e estes são mantidos a uma temperatura de cerca de 200 °C durante, aproximadamente, doze minutos. Este túnel apresenta um comprimento total de 15,4 m, 1,1×3,46×74 m como as dimensões úteis de trabalho e o trajeto efetuado pelos discos dentro deste é em forma de 'U'.

Neste túnel existem 2 queimadores com uma potência, cada um, de 279500 kcal·h⁻¹ e 9 ventiladores que permitem, cada um, a recirculação até 3000 m³·h⁻¹ de ar. Este ar dos ventiladores não entra em contato com o interior da estufa onde passam as antenas parabólicas e serve apenas para evitar o sobreaquecimento do permutador existente nesta zona. Existe um exaustor na parte superior da estufa, com capacidade para fazer a exaustão de 3000 m³·h⁻¹ de ar e gases provenientes dos queimadores existentes na estufa, do túnel de secagem de humidades e da estufa a uma velocidade de cerca de 5,6 m·s⁻¹.

Este é o último processo que ocorre na secção de pintura nº 3 e após saírem do túnel de polimerização, no caso de ser necessário colocar logótipos, os discos são direcionados para a tampografia/serigrafia.

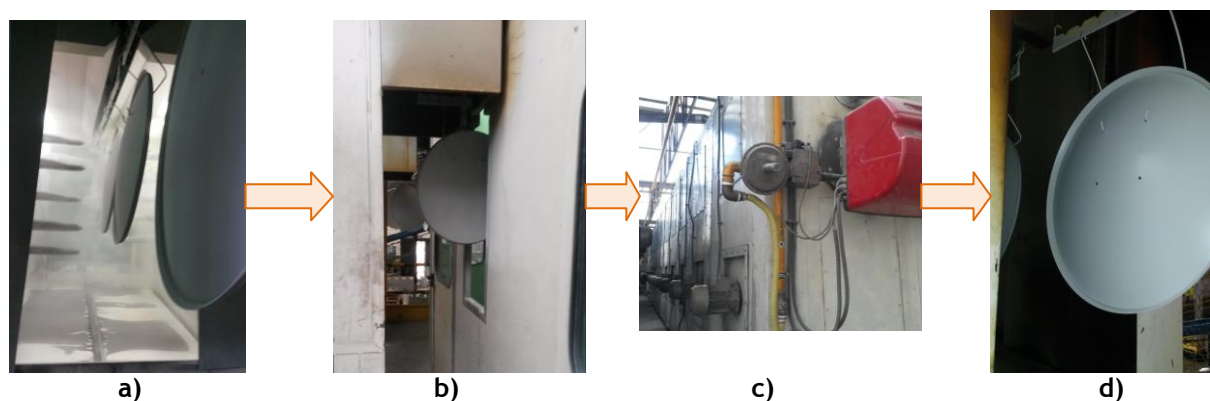


Figura 10: Túnel de polimerização: a) Cabine de pintura; b) Saída da cabine e entrada na estufa; c) Ventiladores e queimador G_1 da estufa; d) Saída da estufa

A Famaval consome elevadas quantidades de energia, sendo a maior percentagem correspondente ao gás natural, cerca de 60% do consumo total de energia. A eletricidade contribui em 35% para este consumo e os restantes 5% correspondem ao gasóleo e outro tipo de fontes energéticas utilizadas na empresa.

Na Figura 11 apresenta-se o consumo mensal de gás natural, durante o ano de 2013, na secção de pintura nº3.

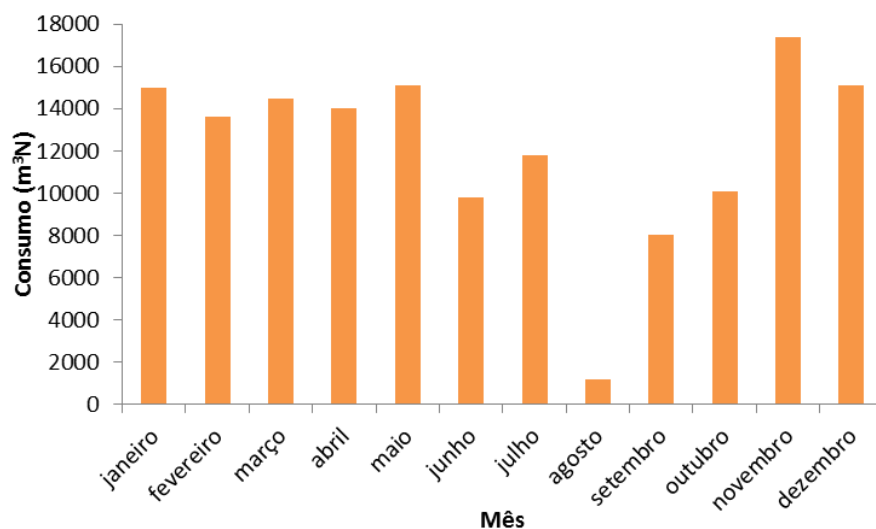


Figura 11: Consumo de gás natural na secção de pintura nº3 durante o ano de 2013.

Através da análise da Figura 11 verifica-se que nos meses mais frios, o consumo de gás natural é mais elevado e nos meses mais quentes este consumo reduz. Conclui-se que a temperatura ambiente afeta diretamente o número de vezes que os queimadores ligam, sendo que quanto menor for esta temperatura, maior é o consumo de gás natural, pois ocorre um arrefecimento mais rápido das superfícies metálicas. No ano de 2013, a Famaval consumiu no total 505282 m^3N deste combustível, sendo que 145600 m^3N correspondem apenas à secção de pintura nº3.

4 Trabalho Realizado

Durante este projeto foram vários os constrangimentos que surgiram e que serviram de obstáculo a uma eficiente obtenção de resultados. A falta de informação referente aos valores de gás natural consumido em cada queimador, a falta de registos da temperatura dos gases de combustão à saída da câmara de combustão, as incertezas associadas aos valores reais das potências dos queimadores, bem como a dificuldade em compreender o processo corretamente, foram os principais problemas deste trabalho. Para contornar esta situação, foi necessário pensar em soluções que permitissem obter esses valores a partir dos recursos disponíveis.

Sempre que se pretende analisar o desempenho de um equipamento ou fazer a quantificação de determinados efluentes envolvidos no processo, é necessário recolher dados, que devem ser representativos, de forma a chegar a melhores resultados finais.

Neste projeto, a primeira análise aos dados foi efetuada durante o mês de março. Os dados a seguir apresentados correspondem a 4 dias de medições.

4.1 Análise aos queimadores

Através de uma análise aos queimadores foi possível registar o número de vezes que os queimadores ligavam no período de recolha de dados e a variação da temperatura da água nos tanques. A informação com estes registos encontra-se no Anexo A.

Os gráficos que se podem obter a partir desses registos estão apresentados nas figuras que se seguem, para alguns dias de medições e para cada queimador.

4.1.1 Queimador PD

Este queimador está inserido na zona de pré-desengorduramento e apresenta uma potência nominal de $378400 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$. A sua função é aquecer a água do tanque de PD até à temperatura pretendida para o processo.

Através da análise da Figura 12, verifica-se que a temperatura da água no tanque de PD varia em função do tempo de uma forma constante, verificando-se oscilações entre os 44°C e os 50°C , indicando quando o queimador liga e desliga, respetivamente. Este queimador ligou cerca de 3 vezes em cada um dos dias apresentados.

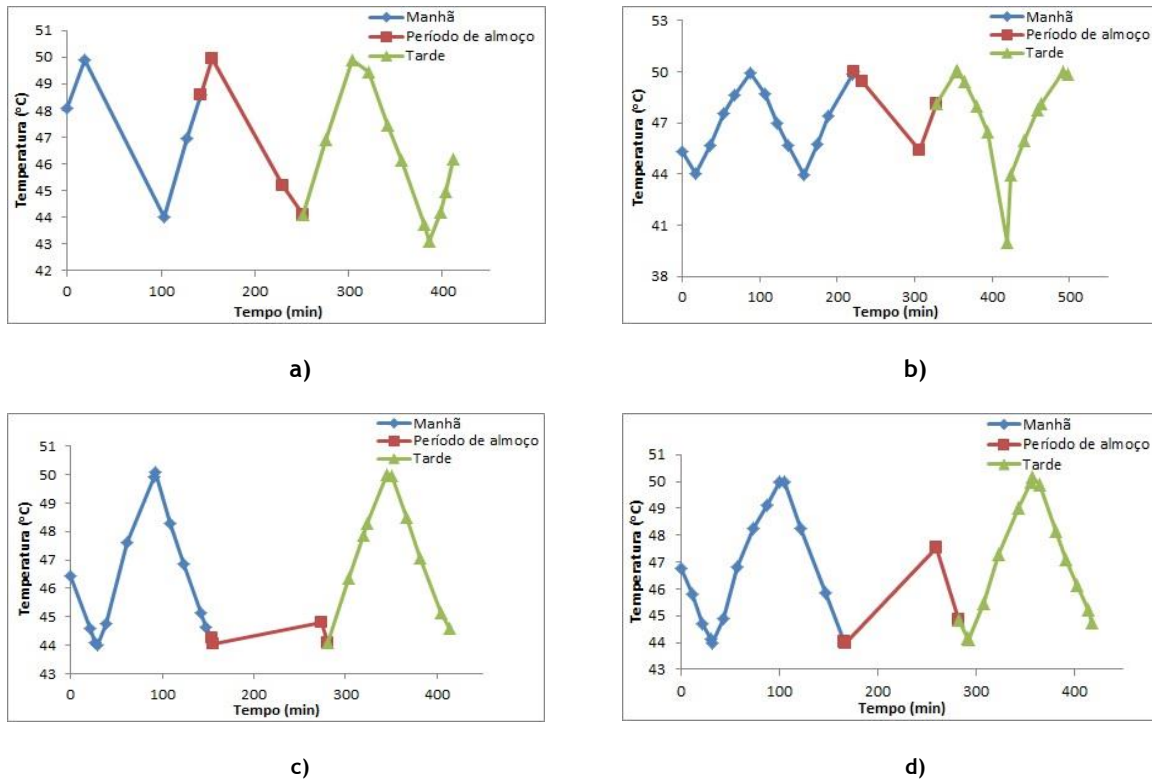


Figura 12: Temperatura vs tempo para o queimador PD: a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

Realizou-se uma recolha de dados, de forma a obter as variações da temperatura ao longo do tempo, durante o período em que o queimador estava em funcionamento. Na Figura 13 apresentam-se os resultados dos registos desses dias.

Através da análise da Figura 13, verifica-se que quando o queimador PD entra em funcionamento, a temperatura do tanque desce ligeiramente abaixo dos 44 °C, por ainda não ter recebido calor suficiente para aumentar. De seguida, apresenta um aumento progressivo até atingir a temperatura aproximada de 50 °C, altura em que o queimador se desliga.

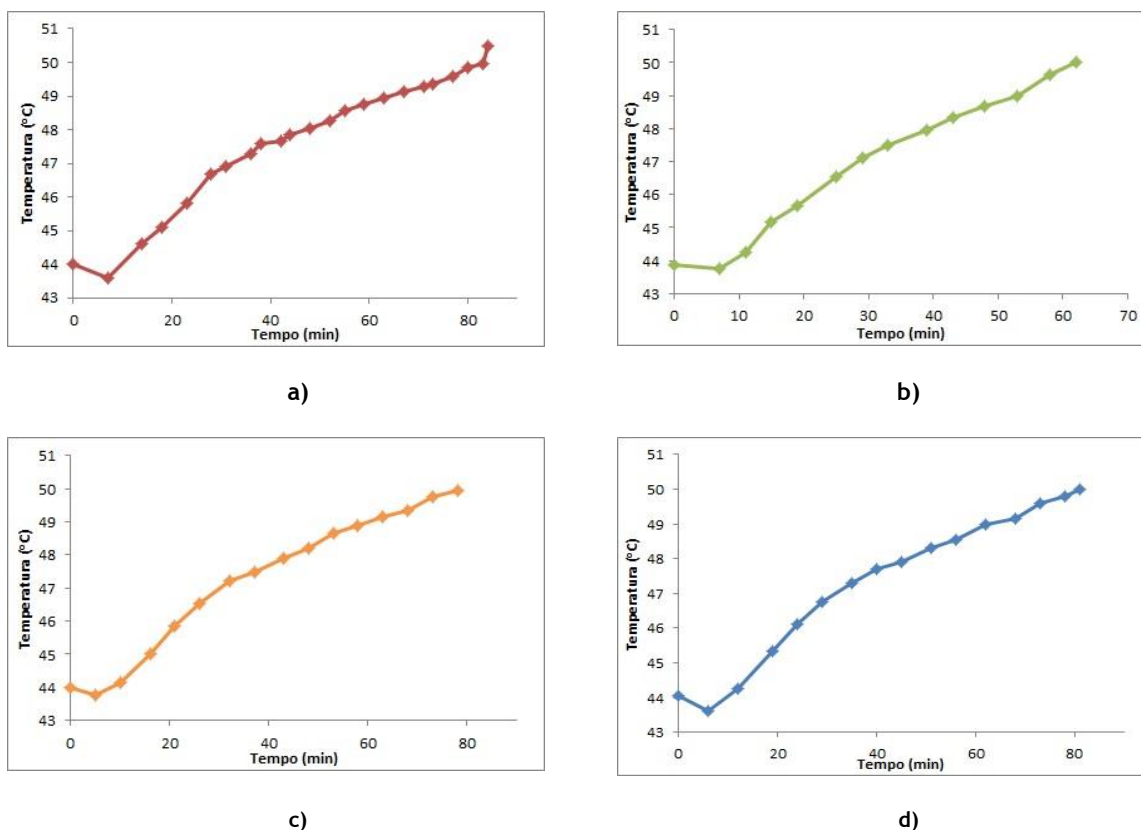


Figura 13: Temperatura vs tempo durante o funcionamento do queimador PD: a) e b) 8/04; c) e d) 9/04

4.1.2 Queimador D

Este queimador está inserido na zona de desengorduramento e fosfatação e apresenta uma potência nominal de $498800 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$. A sua função é aquecer a água do tanque de D até à temperatura pretendida para o processo.

Por análise da Figura 14, verifica-se que quando a temperatura atinge, aproximadamente, os 39°C , o queimador liga, voltando a desligar quando se atinge 45°C . Na Figura 14-d), como o queimador esteve sempre desligado, a temperatura foi diminuindo lentamente e de forma gradual ao longo do tempo. Este queimador ligou, em cada dia, uma vez, havendo somente um dia em que ligou duas.

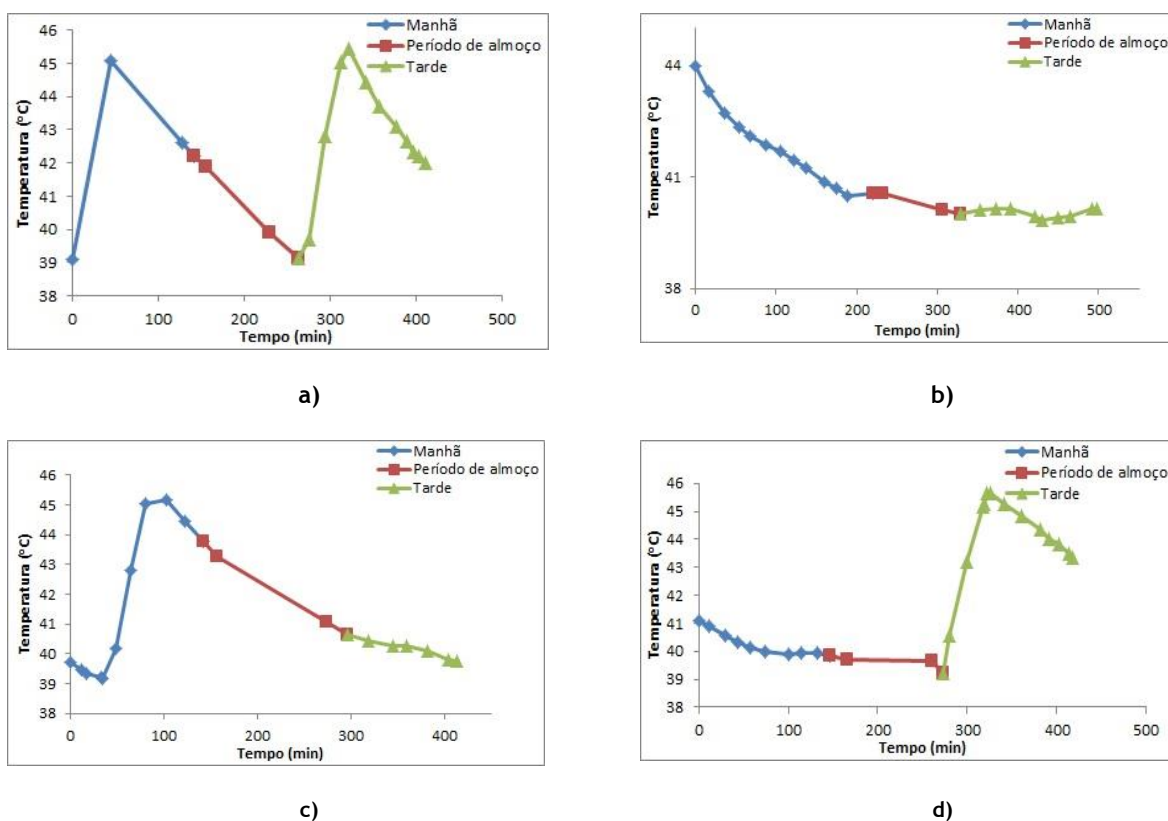
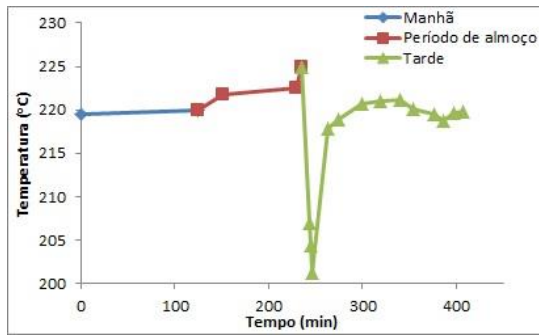


Figura 14: Temperatura vs tempo para o queimador D: a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

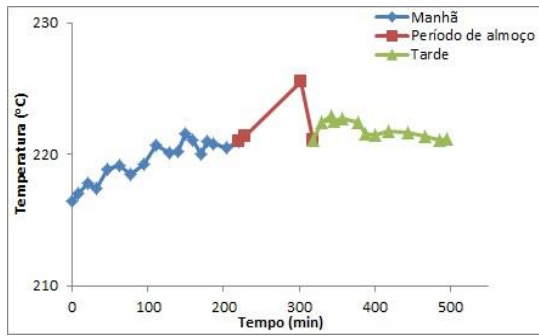
Os queimadores G_1 e G_2 estão inseridos na estufa e apresentam uma potência nominal de $279500 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$, cada um. Têm como função aquecer o ar no interior da mesma, mantendo-a a uma temperatura próxima de 200°C , para garantir que os discos saiam com a tinta totalmente polimerizada desta estufa.

4.1.3 Queimador G_1

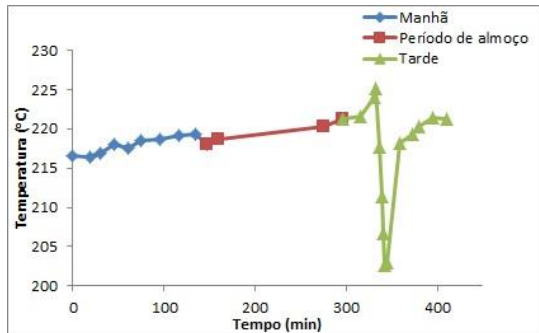
O queimador G_1 encontra-se sempre ligado até a estufa atingir uma temperatura que ronda os 225°C . Quando esta temperatura é atingida, o queimador desliga, havendo um arrefecimento muito rápido, que faz com que a temperatura desça de forma abrupta até atingir aproximadamente os 201°C (Figuras 15-a) e c)). Como consequência, o queimador volta a ligar novamente passados alguns minutos e verifica-se um aumento lento, mas progressivo, da temperatura.



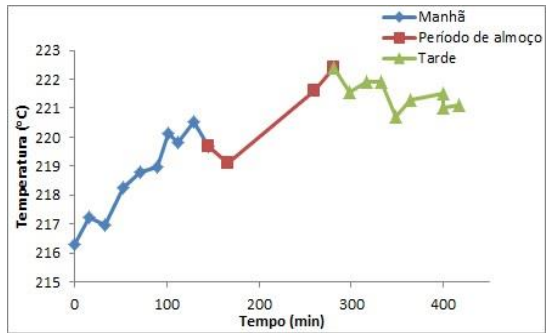
a)



b)



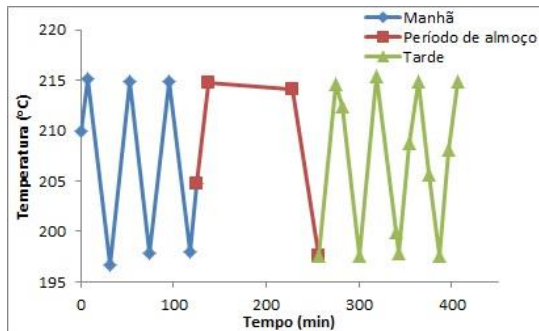
c)



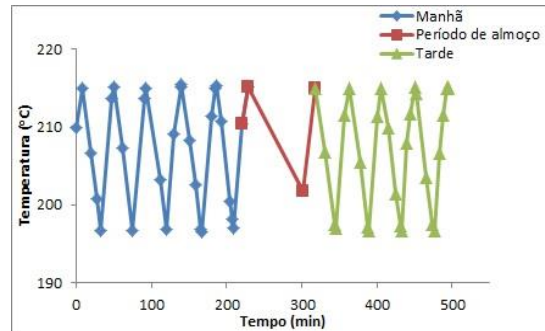
d)

Figura 15: Temperatura vs tempo para o queimador G_1 : a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

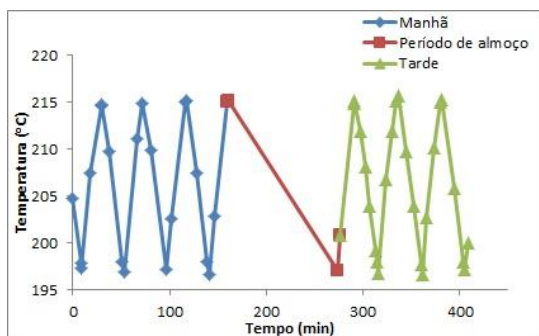
4.1.4 Queimador G_2



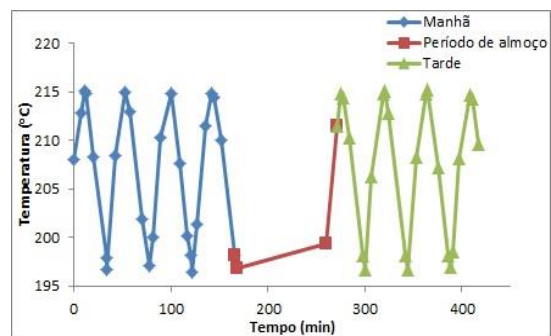
a)



b)



c)



d)

Figura 16: Temperatura vs tempo para o queimador G_2 : a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

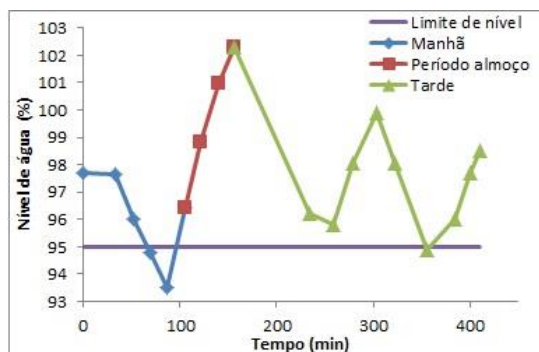
Verifica-se que a variação da temperatura com o tempo no queimador G_2 apresenta oscilações constantes, que ocorrem entre os 197 °C e os 215 °C, período no qual o queimador liga e desliga, respetivamente.

4.2 Quantificação dos níveis de água

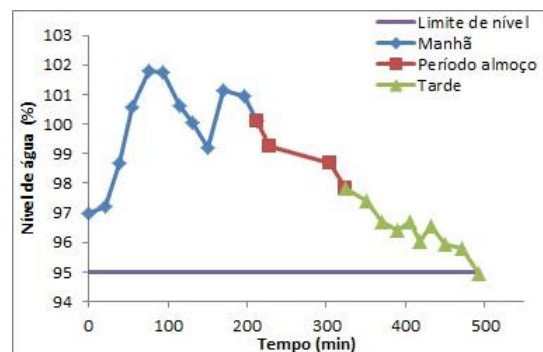
Com as percentagens de água registadas é possível traçar o perfil da variação do nível da água com o tempo. A informação referente a estes registos encontra-se no Anexo A.

A introdução de água nos tanques é acionada, através de uma bomba, quando o nível de água atinge valores inferiores aos limites mínimos estabelecidos. Nos dias aqui apresentados, o limite nos tanques de PD, D e L_2 era 95%, no tanque L_1 era 90% e o valor no tanque LD era 85%.

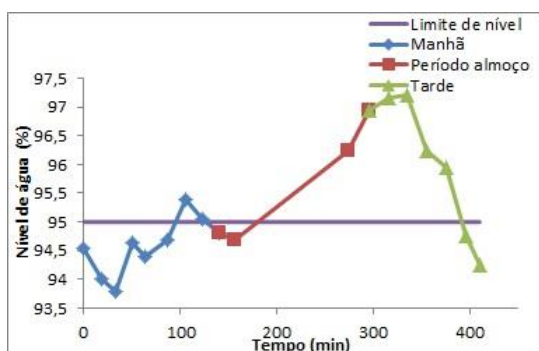
4.2.1 Tanque de PD



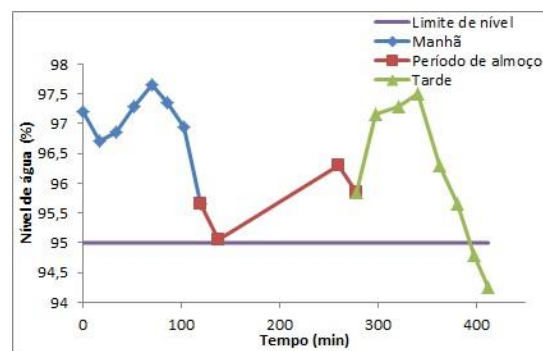
a)



b)



c)

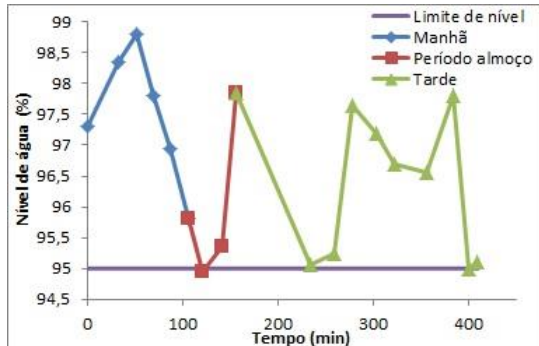


d)

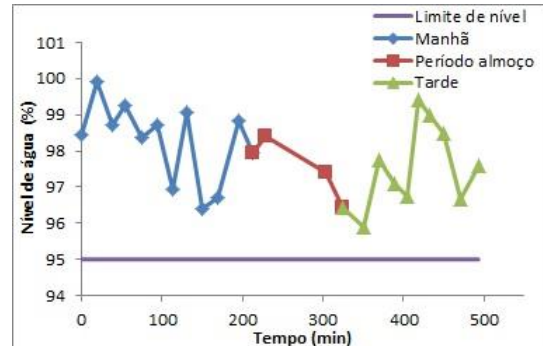
Figura 17: Nível de água vs tempo para o tanque de PD: a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

4.2.2 Tanque de D

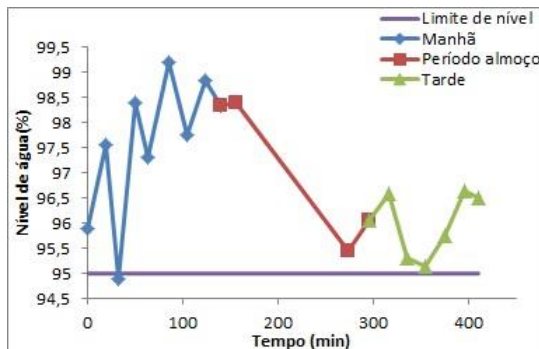
Nos 4 dias mencionados neste projeto, não houve necessidade de reintroduzir água no tanque, pois os níveis de água encontraram-se sempre acima do valor mínimo estabelecido.



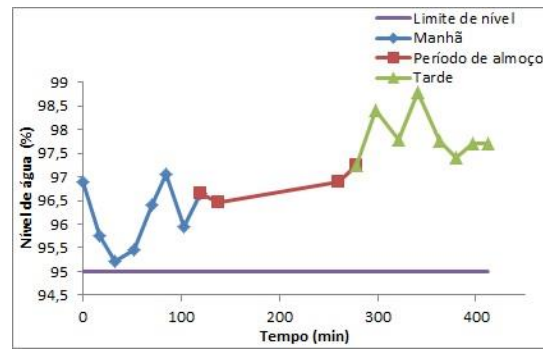
a)



b)



c)

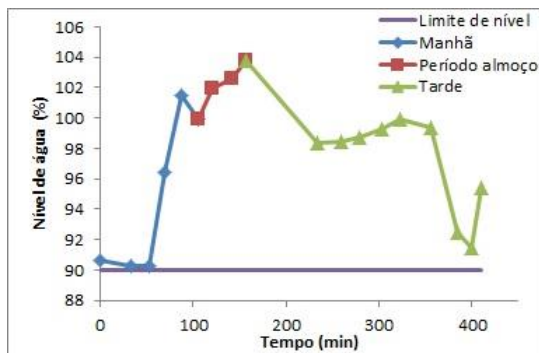


d)

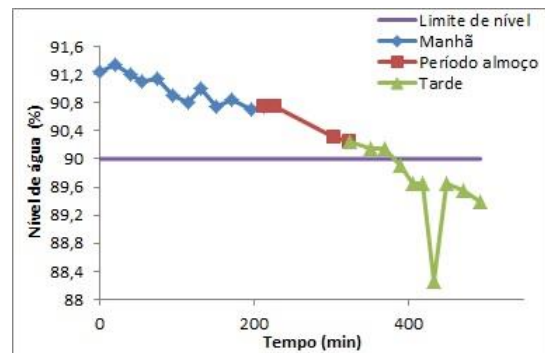
Figura 18: Nível de água vs tempo para o tanque de D: a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

4.2.3 Tanque de L₁

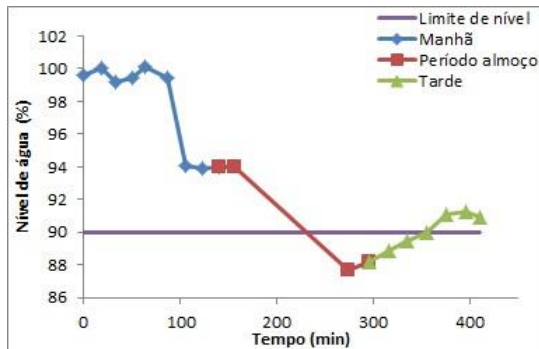
Os limites estabelecidos foram atingidos, pelo que que a reposição de água foi necessária (Figura 19- b), c) e d)).



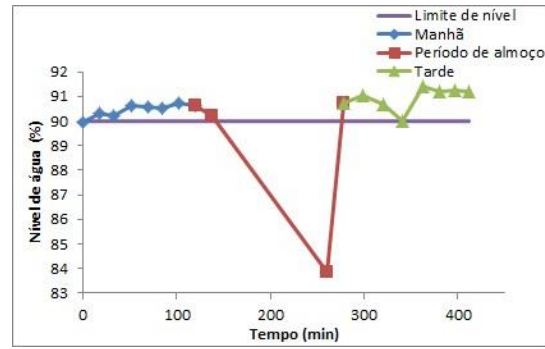
a)



b)



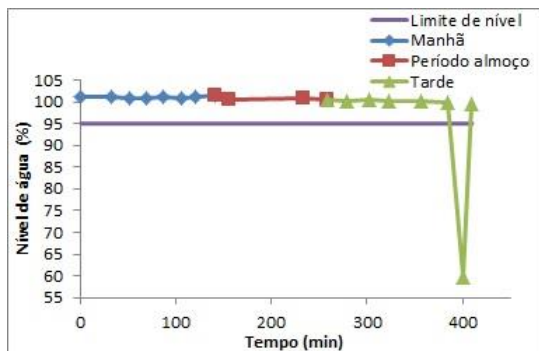
c)



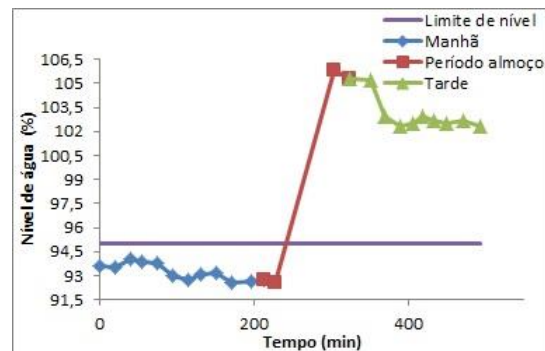
d)

Figura 19: Nível de água vs tempo para o tanque de L_1 : a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

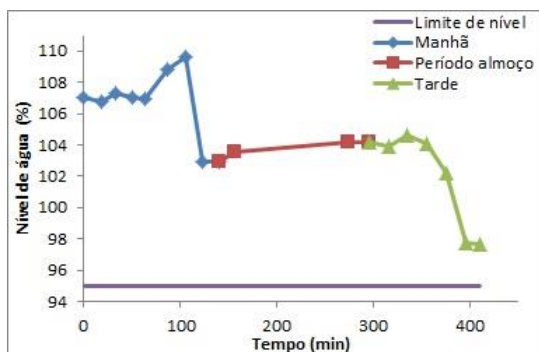
4.2.4 Tanque de L_2



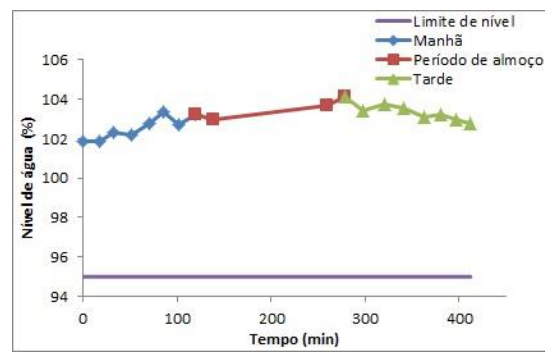
a)



b)



c)



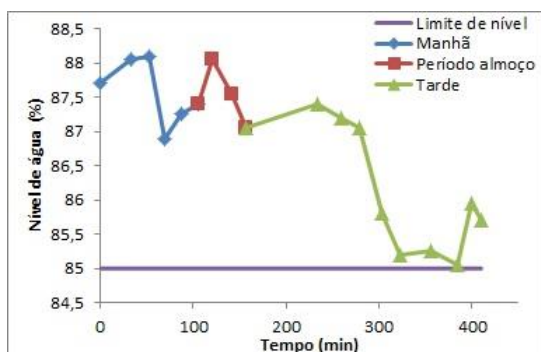
d)

Figura 20: Nível de água vs tempo para o tanque de L_2 : a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

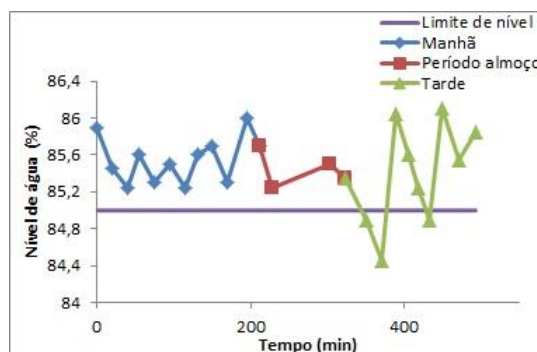
Da análise da Figura 20-a), verifica-se que o limite estabelecido foi atingido quase ao fim do dia, altura em que a bomba foi acionada e o tanque reabastecido.

A bomba esteve cerca de 10 minutos em funcionamento até o nível de água no tanque ser superior aos 95%.

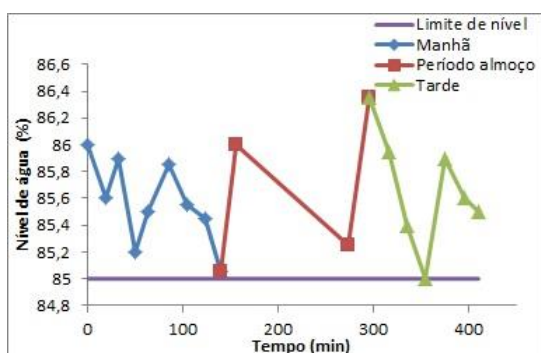
4.2.5 Tanque de LD



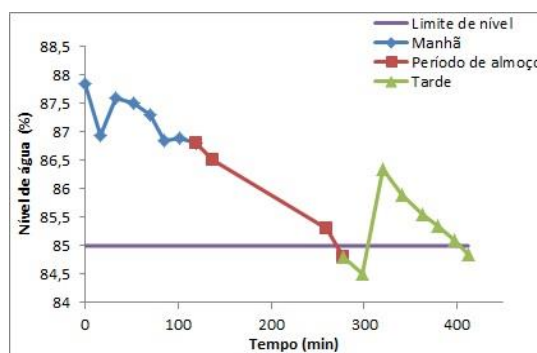
a)



b)



c)



d)

Figura 21: Nível de água vs tempo para o tanque de LD: a) 10/03; b) 11/03; c) 12/03; d) 13/03.

De acordo com a Figura 21- b) e d), foi necessário accionar a bomba durante alguns minutos, para que a água no tanque fosse resposta até um nível acima do mínimo.

4.3 Outras medições efetuadas

Com o uso de um termómetro mediram-se as temperaturas dos gases de combustão, à saída da câmara de combustão. Uma média dos valores registados está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Temperatura dos gases de combustão para os diferentes queimadores.

Queimador	T_{gc} (°C)
PD	182,45
D	100,07
G_1	256,51
G_2	234,1

Mediu-se com a ajuda de uma proveta com capacidade de 50 ml, a quantidade de água que seguia nos discos, na passagem da zona de PD para a zona de D. Estes valores apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4: Volume desperdiçado na passagem da zona de PD para a zona de D.

$V_{PD-D} \text{ (ml} \cdot \text{min}^{-1})$	Média ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$)
12	11,25
12	
9	
12	

Com o auxílio de um termómetro capaz de medir a temperatura em líquidos, mediu-se a temperatura da água que entrava novamente no tanque após ser projetada para a lavagem dos discos. Esta medição foi efetuada quando o queimador estava ligado, quando se encontrava desligado e quando a temperatura da água no tanque se encontrava no valor mínimo antes do queimador voltar a ligar. Esses valores apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5: Temperaturas da água no tanque de PD e da água que regressa ao tanque após a lavagem.

$T_{\text{água}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$T_{\text{retorno}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$
49	48
48,5	47,8
46,5	45,9
45,2	44,5
44,2	43,5

Na Figura 22 é possível verificar o local onde foram efetuadas as medições de temperatura do líquido que é projetado sobre os discos a partir do tanque de PD e que entra novamente neste tanque. O caudal deste líquido é elevado, pelo que, o volume de água desperdiçado durante a passagem da Zona de PD para a Zona D, apresentado na Tabela 4, será desprezável para efeitos de cálculos e considerar-se-á que o caudal que sai do tanque para projeção nos discos é igual ao que volta a entrar no tanque.



Figura 22: Entrada da água projetada sobre os discos no tanque de PD.

A Figura 23 permite visualizar como são as condutas na parte superior dos túneis de secagem e polimerização.

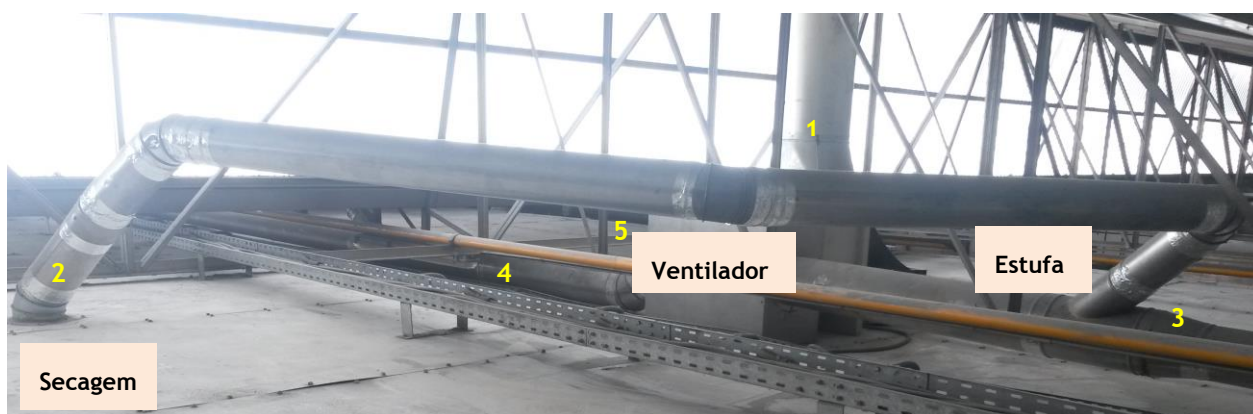


Figura 23: Condutas de saída de gases e ar quente do túnel de secagem e da estufa.

Legenda:

- 1- Conduta de saída dos gases provenientes de todas as condutas.
- 2- Conduta de saída dos gases do túnel de secagem.
- 3- Conduta dos gases de combustão provenientes de G_1 .
- 4- Conduta dos gases de combustão provenientes de G_2 .
- 5- Conduta de saída de ar quente da estufa.

Desta forma, procedeu-se à medição das temperaturas nas condutas à saída dos queimadores (G_1 e G_2), do túnel de secagem (2), da estufa (5) e na conduta de saída dos gases provenientes de todas as condutas (1), obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Temperaturas à saída de cada conduta.

Conduta	T (°C)	Diâmetro (m)
1	98	0,35
2	138,2	0,15
G_1	256,2	0,3
G_2	194,1	
5	181,4	0,15

5 Principais Resultados

A maioria dos combustíveis utilizados no processo de combustão são hidrocarbonetos. Como já foi referido (Capítulo 1), o combustível utilizado pela Famaval é o gás natural e o teor de metano presente na composição do mesmo é muito próximo dos 90% (Tabela 1).

A combustão é completa, se todo o combustível for queimado. No caso de aparecerem moléculas de combustível nos produtos da combustão, dá-se a designação de combustão incompleta [13].

A combustão ocorre por mistura de um combustível com um comburente. Neste caso específico o comburente é o ar, mais precisamente o oxigénio do ar, pelo que é necessário atender à sua composição padrão (Tabela 7) [13].

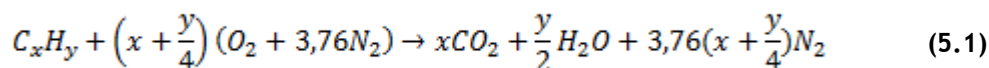
Tabela 7: Composição padrão do ar, em volume.

N ₂ (%)	78,09
O ₂ (%)	20,95
Ar (%)	0,93
CO ₂ (%)	0,03

Atendendo às massas moleculares dos constituintes, a massa molar do ar é 28,967 g·mol⁻¹. Para a resolução de problemas de combustão, despreza-se o árgon e o dióxido de carbono, sendo o ar apenas constituído por 21% de O₂ e 79% de N₂.

A partir desta simplificação, pode concluir-se que por cada mol de O₂ estão envolvidos 3,76 mol de N₂ (79%/21%) [13].

Assim, utiliza-se a seguinte expressão geral para a combustão de um hidrocarboneto genérico:



Para se obter uma combustão completa, com uma chama curta e estável e um baixo excesso de ar, é fundamental uma boa mistura combustível/ar. Cada combustível necessita de uma quantidade exata de ar para queimar completamente e essa quantidade depende dos teores de carbono e hidrogénio que o combustível contém [13].

No caso industrial como não há uma homogeneização perfeita entre o ar e combustível é praticamente impossível obter uma combustão completa sem ter excesso de ar. Tal só se conseguiria se a quantidade de comburente fosse superior à teoricamente necessária [13].

A quantidade de ar, efetivamente fornecida, é expressa em termos da percentagem de ar teórico. Define-se a riqueza da mistura (r), como:

$$r = \frac{CA}{CA_{esteq.}} = \frac{AC_{esteq.}}{AC} \quad (5.2)$$

Em que:

AC - razão entre as massas de ar e combustível;

CA - razão entre as massas de combustível e do ar.

No caso de $r=1$, a mistura combustível/comburente é uma mistura estequiométrica, o que se verifica quando os produtos da reação não contêm oxigénio.

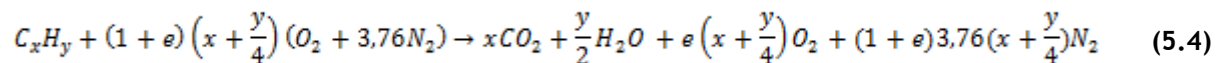
Quando $r>1$, a mistura é rica, havendo excesso de combustível ou falta de ar para o queimar.

Se, pelo contrário, $r<1$, a quantidade de ar para queimar todo o combustível é maior do que a teoricamente necessária e a mistura designa-se pobre [13].

O excesso de ar (e) de uma mistura pobre pode ser calculado através da expressão:

$$e = \frac{1 - r}{r} \quad (5.3)$$

Aplicando à expressão (5.1) o coeficiente do excesso de ar, obtém-se uma nova expressão para o hidrocarboneto genérico:

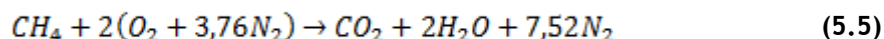


Numa combustão incompleta o combustível não liberta todo o calor que é capaz de fornecer e a presença de CO e O_2 nos gases de combustão pode levar à queima retardada do CO a CO_2 , o que provoca altas temperaturas em locais não desejáveis. É por causa desta situação que se utiliza excesso de ar para a combustão completa.

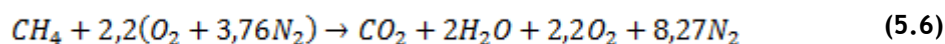
No entanto a operação deverá ser feita com o menor excesso de ar possível, pois em quantidades mais elevadas também é indesejável. Quanto maior a quantidade de ar que terá de ser aquecido pela chama, menor a temperatura resultante na mesma, o que leva a uma menor troca de calor, diminuindo a eficiência e capacidade do equipamento [13].

Os cálculos a seguir apresentados foram efetuados considerando 100% de metano na composição do gás natural, de forma a facilitar a obtenção de resultados e uma vez que as quantidades dos outros componentes eram pouco significativas para serem consideradas nos cálculos.

Tendo como base a expressão 5.1, a reação de uma mole de metano com o ar expressa-se da seguinte forma:



Partindo da expressão 5.4 e considerando 10% como a percentagem de ar em excesso, obtém-se:



A quantidade de reagentes e produtos, com o excesso de ar, expressa em quilogramas está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8: Quantidade de reagentes e produtos da combustão.

		Base mássica (kg)
Reagentes	CH ₄	0,016
	O ₂	0,0704
	N ₂	0,2978
Produtos	CO ₂	0,044
	H ₂ O	0,036
	O ₂	0,0064
	N ₂	0,2978

Depois de uma análise detalhada ao problema em questão e considerando os dados apresentados no Capítulo 4, considerou-se como uma opção possível a recuperação de calor a partir dos gases de combustão de um queimador que se encontrasse sempre em funcionamento. As hipóteses a serem consideradas seriam os dois queimadores da zona de secagem e o queimador G₁ da zona de polimerização. Os queimadores da zona de secagem não podem ser considerados no estudo, pois funcionam em regime de queima direta de combustível, ou seja, o gás é injetado puro diretamente na zona de combustão, através de bicos instalados com um diâmetro pequeno, pelo que não é possível quantificar nem obter a temperatura dos gases de combustão.

O queimador G₁ funciona em regime de pré-mistura, o que permite medir a temperatura de saída dos gases de combustão na conduta e quantificá-los. Desta forma, torna-se possível calcular o calor que é possível recuperar a partir dele.

Pretende-se diminuir o tempo que um queimador está ligado para aquecer a água até à temperatura pretendida de 50 °C, de forma a reduzir o consumo de gás natural. Como

existem dois queimadores, um em cada tanque de lavagem, seleccionou-se aquele que apresenta um maior número de horas de operação, consumindo, como tal, mais gás natural. Como foi possível verificar no capítulo anterior, o queimador PD, no período em que foram efetuadas as medições, esteve ligado cerca de 3 vezes por dia. O queimador D, nesse mesmo período, ligou no máximo uma vez, em cada dia. Conclui-se que este é o queimador que consome menos gás natural, pois funciona menos vezes quando comparado com o queimador PD.

Assim sendo, o queimador que se encontra mais horas em funcionamento é o queimador que aquece a água do tanque de pré-desengorduramento, sendo este o seleccionado para os estudos em causa.

Os queimadores PD e G₁ funcionam em regime modulante, o que indica que a potência dos mesmos é variável ao longo do tempo. Das informações que foram possíveis obter junto da Famaval, verificou-se que os queimadores começam por trabalhar a uma potência mínima, que vai aumentando lentamente, até atingir um patamar constante, que corresponde à potência máxima modulante desse queimador. O tempo de passagem da potência mínima para a máxima é de aproximadamente 15 minutos.

A potência mínima e máxima que o queimador PD pode atingir não foi um dado conhecido, pelo que foi necessário recorrer ao catálogo referente ao modelo do queimador e, a partir das características do mesmo, estimar essa informação. Em relação ao queimador G₁, esses valores já foram mais fáceis de obter, uma vez que essa informação encontrava-se no Relatório da Fimel, referente à Descrição Técnica desta secção de pintura. Estes dados apresentam-se na Tabela 9 [12,14].

Tabela 9: Modulação dos queimadores.

Queimador	Potência (kcal·h ⁻¹)		
	Mínima	Máxima	Média
PD	65360	199520	132440
G ₁	44720	140180	92450

A partir do valor médio obtido para as potências dos queimadores foi possível calcular a quantidade de gás natural que cada um consome por hora. Para tal, utilizou-se a expressão a seguir apresentada:

$$Q_{\text{gás}} = \frac{\frac{P_{\text{queimador}}}{\eta}}{PCI} \quad (5.7)$$

Considerando, para efeitos de cálculo, que os queimadores operam a uma eficiência de 85% e utilizando os dados das Tabelas 2 e 9, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Caudal de gás natural.

Queimador	$Q_{\text{gás}} \text{ (m}^3\text{N}\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$
PD	17,01
G1	11,87

A partir dos dados das Tabelas 8 e 10 foi possível obter a quantidade de gases de combustão que são libertados, por hora, quando cada um dos queimadores está ligado.

A quantidade total de gases de combustão libertados durante o funcionamento dos queimadores é de $293,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ e $203,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, para o queimador de PD e para o queimador G_1 , respetivamente. As quantidades obtidas para cada componente dos gases de combustão estão apresentadas no Anexo B.

Segundo o Relatório de Descrição Técnica, cada bomba debita $110 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, o que perfaz um caudal total de $3,667 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, considerando as duas bombas em simultâneo. Utilizou-se este caudal no processo iterativo.

Os estudos desenvolvidos foram aplicados aos dias em que se efetuaram as medições e os dados relevantes para o processo iterativo encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11: Dados utilizados no processo iterativo.

dt (min)		1
t_0 (min)		0
T_i (°C)		44
T_f (°C)		50
$P_{\text{queimador}}$ (kcal·min ⁻¹)	Mínima	1089,3
	Máxima	3325,3
V_{tanque} (m ³)		6,5
Q_{bombaT} (m ³ ·min ⁻¹)		3,667
ΔT_1 (°C)		6

Em que ΔT_1 é a variação de temperatura no tanque.

Sabendo o tempo que o queimador esteve ligado foi possível determinar qual o caudal de água que a bomba estava a debitar, procedendo, para tal, à alteração do caudal da bomba que se tinha inicialmente. Esta tarefa foi realizada recorrendo à função “Atingir objetivo” do MS Excel.

Exemplo:

Para o dia 10/03 e observando os dados no Anexo A, o primeiro registo que se fez permitiu concluir que o queimador PD esteve ligado cerca de 51 minutos.

A temperatura final da água no tanque (T_f) calcula-se a partir da seguinte equação:

$$T_f = T_i + dt \left[\frac{P_{\text{queimador}}}{V_{\text{tanque}} \times C_{p_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}}} + \frac{Q_{\text{bombaT}} \times (-\Delta T_2)}{V_{\text{tanque}}} \right] \quad (5.8)$$

Esta equação deriva duma aproximação de primeira ordem de um balanço diferencial de energia aplicado ao tanque de pré-desengorduramento (Anexo B).

Em que $\Delta T_2 = 0,75 \text{ } ^\circ\text{C}$ (média dos valores da Tabela 5).

A potência do queimador utilizada na Equação 5.8 não é constante, uma vez que o queimador não se encontra sempre à mesma potência durante o tempo em que está em funcionamento. Ele começa a funcionar a uma potência mínima, que vai aumentando ao longo do tempo até atingir um patamar constante. No Anexo B encontra-se o gráfico que representa esta variação de potência com o tempo.

Após atingir os 51 minutos, se T_f não for igual a $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, utiliza-se a função do MS Excel atrás referida: **Dados→Análise de hipóteses→ Atingir objetivo**. Para tal, seleciona-se a célula de T_f ao fim dos 51 minutos (que neste caso correspondia à célula M80) e aparece uma janela igual à da Figura 24.

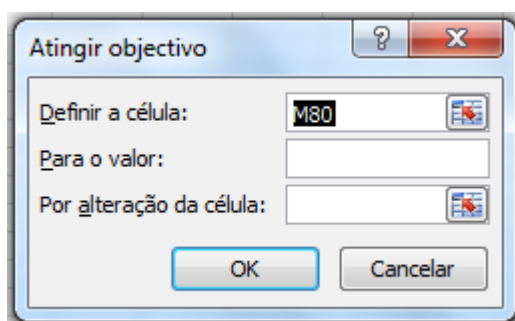


Figura 24: Janela da função do MS Excel utilizada.

Onde tem escrito “Para o valor:” coloca-se 50, pois é a temperatura final que se pretende para a água do tanque. Onde tem escrito “Por alteração da célula:”, seleciona-se a célula referente ao Q_{bombaT} , fazendo variar esse valor. Desta forma é indicado o valor do caudal de água debitado pela bomba necessário para atingir os $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ ao fim de 51 minutos.

A Famaval opera todos os dias úteis da semana, incluindo sábado até às 14 h; ao domingo a empresa começa a laborar às 22 h. Isto perfaz um total de 32 horas semanais sem operar, o que num mês equivale a 128 h e que corresponde a cerca de seis dias sem produção.

Assim sendo, os cálculos relacionados com o consumo de gás natural são efetuados, considerando 25 dias por mês de funcionamento contínuo da empresa. Durante o mês de agosto a empresa está sem produzir durante cerca de duas semanas e, assim sendo, o valor anual obtido a partir dos cálculos é considerando 290 dias de funcionamento anual.

O período de medições ocorreu, aproximadamente, entre as 9 h e as 18 h de cada dia.

A partir do painel de controlo existente nesta secção de pintura, foi possível analisar o histórico da variação da temperatura no tanque de PD, o que permitiu verificar, através das oscilações da temperatura, o número de vezes que o queimador PD ligou entre as 18 h e as 9 h (período em que não se efetuaram medições). Este período engloba o funcionamento do queimador PD durante a noite e, como a temperatura ambiente é mais baixa, as superfícies dos discos que entram no túnel de Tratamento de Superfície encontram-se mais frias quando comparadas com a temperatura de entrada durante o dia, fazendo com a água do tanque de PD arrefeça mais rapidamente.

Na Tabela 12 apresentam-se os valores referentes ao tempo que o queimador está ligado e o consumo atual de gás natural para um dia em que se efetuaram medições. Os valores relativos a alguns dias em que se fizeram medições encontram-se no Anexo B.

Tabela 12: Tempo atual de funcionamento do queimador PD e consumo atual de gás natural no dia 13/03.

Dia	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
13	71	17,8
	63	15,8
	65	16,3

Nos períodos noturnos, o queimador PD liga cerca sete vezes. Considerando tal facto, e tendo em conta uma média do tempo que este queimador está ligado durante o dia, estimou-se o consumo de gás natural durante a noite. Adicionando aos valores obtidos durante o dia, os calculados para o período da noite, foi possível calcular a quantidade de gás natural consumida diariamente, mensalmente e anualmente na empresa. Esses valores apresentam-se na Tabela 13.

Tabela 13: Consumo diário, mensal e anual de gás natural, sem permutador de calor.

Dia	Consumo (m ³ N)
<i>Diário</i>	158,6
<i>Mensal</i>	3964,6
<i>Anual</i>	45986,3

Estudo I

Ao adicionar um permutador ao processo, por forma a aproveitar o calor dos gases de combustão para aquecer a água do tanque, é possível reduzir o consumo de gás natural, pois o queimador PD funcionará durante menos tempo.

Do balanço ao permutador sabe-se que a quantidade de gás que entra neste é igual à quantidade que sai, assim como a quantidade de água que entra no permutador é igual à que dele sai. É possível determinar o calor transferido entre os dois fluidos (Q_{gc}), recorrendo à seguinte equação:

$$Q_{gc} = \dot{v}_{gc} \times \rho_{gc} \times C_{p_{gc}} \times \Delta T_{gc} \quad (5.9)$$

O caudal volúmico dos gases de combustão (\dot{v}_{gc}) já foi calculado anteriormente, pelo que o seu valor, em quantidade volúmica é $322,57 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Assume-se para efeitos de cálculo que a diferença de temperatura entre os gases de combustão de entrada e saída (ΔT_{gc}) é de 150°C . Desta forma, o calor transferido dos gases de combustão para a água do tanque corresponde a $7327,6 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$.

Convertendo para uma quantidade volúmica, obtém-se a quantidade de água que é necessária retirar ao tanque para fazer passar no permutador (\dot{v}_a).

$$\dot{v}_a = 1,22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.10)$$

Para saber se esta medida traz vantagens relevantes para a Famaval, aplicou-se exatamente o mesmo raciocínio utilizado anteriormente, apenas com um fator adicional, que é a quantidade de água que se retira do tanque para fazer passar no permutador. Desta forma, a Equação 5.8 passa a ter mais um termo:

$$T_f = T_i + dt \left[\frac{P_{queimador}}{V_{tanque} \times C_{p_{água}} \times \rho_{água}} + \frac{Q_{bombaT} \times (-\Delta T_2)}{V_{tanque}} + \frac{\dot{v}_a \times \Delta T_1}{V_{tanque}} \right] \quad (5.11)$$

Resolvendo o processo iterativo foi possível determinar o tempo que o queimador PD está ligado e o consumo de gás natural. Na Tabela 14 apresentam-se esses valores para um dia; os valores obtidos para outros dias encontram-se no Anexo B.

Tabela 14: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural após adição de um permutador de calor, no dia 13/03 (estudo II).

Dia	Tempo (min)	Consumo (m^3N)
13	62	15,6
	55	13,8

	57	14,3
--	----	------

Na Tabela 15 apresentam-se os valores referentes às poupanças de tempo que o queimador PD está ligado e o consumo de gás natural para um dia de medições. Comparativamente com a Tabela 12, ocorreu uma redução de 8 e 9 minutos no tempo de funcionamento do queimador PD.

No Anexo B, encontram-se os resultados obtidos para outros dias de medições. Analisando esses valores e comparando-os com os valores obtidos sem adição de permutador de calor ao processo, verifica-se uma redução do tempo que o queimador está ligado em alguns minutos, sendo que a poupança máxima atingida é de 10 minutos e verifica-se para o dia 11/03. A redução mínima atingida corresponde a 5 minutos e foi obtida para o dia 10/03.

Tabela 15: Poupança no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural no dia 13/03 (estudo I).

Dia	Tempo (min)	Consumo (m³N)
13	9	2,3
	8	2
	8	2

Na Tabela 16 apresentam-se as poupanças diárias, mensais e anuais que se poderiam obter com a implementação do permutador de calor, para este caso. Com base nestes dados seria possível obter uma poupança anual de gás natural de cerca de 5400 m³N.

Tabela 16: Poupanças diária, mensal e anual de gás natural, com permutador de calor (estudo I).

	Poupança (m³N)
<i>Diária</i>	18,6
<i>Mensal</i>	465,5
<i>Anual</i>	5399,4

Estudo II

Para se recuperar a maior quantidade de calor possível, é necessário partir de temperaturas altas e, como já se verificou, essas temperaturas pertencem aos gases de combustão resultantes dos queimadores G₁ e G₂. Analisando a Tabela 6, observa-se que a temperatura mais alta, a seguir às atrás mencionadas, provém da conduta de saída de ar quente da estufa.

O raciocínio a ser aplicado é igual ao anteriormente descrito, no entanto, agora pretende-se que o permutador de calor adicionado ao processo permita aproveitar o calor proveniente do ar quente que sai da estufa para aquecer a água do tanque de PD.

O caudal de ar quente que sai da estufa é variável, sendo o valor mínimo registado de $186 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Desta forma, desenvolveram-se cenários para diferentes valores de caudais, mais concretamente para os valores de $186 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $215 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $240 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, sendo este último valor considerado um máximo que se poderia atingir. A partir destes caudais, utilizando a Equação 5.12 e assumindo que a diferença de temperatura entre o ar quente que entra no permutador e o que sai (ΔT_{ar}) é de 100°C , foi possível obter o calor transferido do ar quente para a água (Q_{ar}).

$$Q_{ar} = \dot{v}_{ar} \times \rho_{ar} \times C_{p_{ar}} \times \Delta T_{ar} \quad (5.12)$$

Convertendo o valor do calor transferido do ar quente para a água numa quantidade volúmica, obteve-se a quantidade de água que se retiraria ao tanque para passar no permutador de calor. Estes valores apresentam-se, para cada cenário diferente, na Tabela 17.

Tabela 17: Calor transferido e caudal volúmico de água para cada cenário (estudo II).

	$\dot{v}_{ar} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$			
	186	215	240	300
$Q_{ar} \text{ (kcal} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	3392,8	3921,8	4377,8	5472,3
$\dot{v}_a \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	0,6	0,7	0,7	0,9

Na Tabela 18 apresentam-se os valores referentes ao consumo de gás natural com a adição do permutador de calor ao processo, para um dia de medições e para cada um dos diferentes cenários. No Anexo B podem ser encontrados os valores referentes a outros dias de medições.

Tabela 18: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural após adição de um permutador de calor, no dia 13/03 (estudo II).

Dia	$\dot{v}_{ar} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$							
	186		215		240		300	
	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
13	67	16,8	66	16,6	65	16,3	64	12,6
	59	14,8	58	14,6	58	14,6	57	11,2

	61	15,3	61	15,3	60	15,1	59	11,8
--	----	------	----	------	----	------	----	------

Na Tabela 19 apresentam-se os valores referentes às poupanças de tempo que o queimador está ligado e consumo de gás natural para um dia de medições. Quando comparados esses valores com os da Tabela 12, verifica-se que ocorre uma redução entre os 4 e os 7 minutos no tempo de funcionamento do queimador PD.

No Anexo B, encontram-se os resultados obtidos para outros dias de medições. Analisando esses valores e comparando-os com os valores obtidos sem adição de permutador de calor ao processo, verifica-se que a diferença entre o tempo que o queimador PD está ligado atualmente e após a adição de um permutador de calor encontra-se no intervalo entre os 3 e 7 minutos.

Tabela 19: Poupança no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural no dia 13/03 (estudo II).

Dia	$\dot{v}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$							
	186		215		240		300	
	Poupança							
	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)
13	4	1	5	1,3	6	1,5	7	5,2
	4	1	5	1,3	5	1,3	6	4,6
	4	1	4	1	5	1,3	6	4,5

Na Tabela 20 apresentam-se as poupanças diárias, mensais e anuais que se poderiam obter com a implementação do permutador de calor, para cada cenário diferente.

Tabela 20: Poupanças diária, mensal e anual de gás natural, para cada cenário (estudo II).

	$\dot{v}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$			
	186	215	240	300
Poupança (m ³ N)				
Diária	9	10,3	11,7	23,4
Mensal	224,9	256,3	292,9	585
Anual	2608,7	2972,7	3397,4	6786,9

Estudo III

O raciocínio a ser aplicado é igual ao descrito para os Estudos I e II, no entanto, agora pretende-se adicionar um permutador de calor ao processo, de forma a aproveitar o calor proveniente dos gases de combustão libertados no queimador G_1 e do ar quente que sai da estufa, para aquecer a água do tanque de PD.

Neste caso, a cada um dos valores dos caudais referidos no estudo II, adicionou-se o valor do caudal dos gases de combustão obtidos no Estudo I e calculou-se uma média entre as temperaturas que saem da conduta do queimador G_1 (256,2 °C) e da conduta que sai da estufa (181,4 °C), obtendo-se o valor de 217,5 °C.

A partir destes valores, utilizando a Equação 5.13 e assumindo que a diferença de temperatura entre o ar quente que entra no permutador e o que sai ($\Delta T_{mistura}$) é de 130 °C foi possível obter o calor transferido para a água ($Q_{mistura}$). O valor da capacidade calorífica para este estudo foi calculado efetuando simulações utilizando valores conhecidos e para cada um dos diferentes cenários, no programa *AspenPlus®* v8.0. Esses valores encontram-se no Anexo B.

$$Q_{mistura} = \dot{V}_{mistura} \times \rho_{mistura} \times C_{p_{mistura}} \times \Delta T_{mistura} \quad (5.13)$$

Convertendo para uma quantidade volúmica o valor do calor transferido da mistura quente para a água, obteve-se a quantidade de água que se retiraria ao tanque para passar no permutador de calor. Estes valores apresentam-se na Tabela 21, para cada um dos diferentes cenários.

Tabela 21: Calor transferido e caudal volúmico de água para cada cenário (estudo III).

	$\dot{V}_{mistura} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$			
	508,6	537,6	562,6	622,6
$Q_{mistura} \text{ (kcal} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	10838	11486	12032	13333
$\dot{V}_a \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	1,8	1,9	2	2,2

Na Tabela 22 apresentam-se os valores referentes ao consumo de gás natural com a adição do permutador de calor ao processo, para cada cenário diferente e para um dia de medições. No Anexo B podem ser encontrados os valores referentes a outros dias de medições.

Tabela 22: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural após adição de um permutador de calor no dia 13/03 (estudo III)

Dia	$\dot{V}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$							
	508,6		537,6		562,6		622,6	
	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
13	58	14,6	58	14,6	57	14,3	56	14,1
	52	13,1	52	13,1	51	12,8	50	12,6
	54	13,6	54	13,6	53	13,3	52	13,1

Na Tabela 23 apresentam-se os valores referentes às poupanças de tempo que o queimador está ligado e consumo de gás natural para um dia de medições. Quando comparados esses valores com os da Tabela 12, verifica-se que ocorre uma redução de 11 ou 13 minutos no tempo de funcionamento do queimador PD.

No Anexo B, encontram-se os resultados obtidos para outros dias de medições. Analisando esses valores e comparando-os com os valores obtidos sem adição de permutador de calor ao processo, verifica-se que a diferença entre o tempo que o queimador PD está ligado atualmente e após a adição de um permutador de calor encontra-se no intervalo entre os 7 e os 13 minutos.

Tabela 23: Poupança no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural no dia 13/03 (estudo III).

Dia	$\dot{v}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$							
	508,6		537,6		562,6		622,6	
	Poupança							
	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)
13	13	3,3	13	3,3	14	3,5	15	3,8
	11	2,8	11	2,8	12	3	13	3,3
	11	2,8	11	2,8	12	3	13	3,3

Na Tabela 24 estão apresentadas as poupanças diárias, mensais e anuais que se poderiam obter com a implementação do permutador de calor, para cada cenário diferente. Conclui-se que neste caso as poupanças são mais elevadas comparativamente aos estudos I e II.

Tabela 24: Poupanças diária, mensal e anual de gás natural para cada cenário (estudo III).

	$\dot{V}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$			
	508,6	537,6	562,6	622,6
Poupança (m ³ N)				
Diária	26,1	27	28,7	31,1
Mensal	653,8	674,8	716,5	776,1
Anual	7583,5	7826,2	8311,5	9003,1

6 Permutadores de calor

Os permutadores de calor são equipamentos térmicos que têm como objetivo promover a transferência de calor de uma corrente para outra que se encontram a temperaturas diferentes.

6.1 Dimensionamento do Permutador de Calor

Como os caudais estudados neste trabalho não são elevados, procedeu-se ao dimensionamento de permutadores de calor de duplo tubo. Este tipo de permutadores consistem na existência de um tubo interno de secção circular que se encontra apoiado dentro de outro tubo. Uma corrente (água) circula através do tubo interno e a outra corrente (gases de combustão, ar ou mistura) circula em fluxo contracorrente através de uma passagem anelar entre a parede externa do tubo interno e a parede interna do tubo externo.

A determinação da área de transferência de calor, A , é o principal objetivo do dimensionamento de um permutador de calor. Considera-se uma diferença de temperaturas, de tal modo que esta permita a troca de calor (Q) pretendida:

$$Q = U \times A \times \Delta T_{lm} \quad (5.14)$$

Sendo U o coeficiente global de transferência de calor. Neste projeto, a constante U seleccionada corresponde ao valor de $227 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Para fluxo em contracorrente a média logarítmica das temperaturas, é calculada a partir da diferença de temperatura entre os fluidos à entrada e à saída do permutador, segundo a equação:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(Th_{in} - Tc_{out}) - (Th_{out} - Tc_{in})}{\left[\frac{(Th_{in} - Tc_{out})}{(Th_{out} - Tc_{in})} \right]} \quad (5.15)$$

Na Tabela 25 estão apresentados alguns dos valores padronizados necessários ao cálculo do dimensionamento dos permutadores. O valor da espessura considerado corresponde a BWG=16 (valor de espessura adequado para pressões de operação próximas da atmosférica) [15].

Tabela 25: Parâmetros assumidos na caracterização da tubagem.

$U \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	227
$D_{ext_1} \text{ (m)}$	0,076
$D_{int_1} \text{ (m)}$	0,073
$D_{ext_2} \text{ (m)}$	0,051
$D_{int_2} \text{ (m)}$	0,048

Recorrendo à Equação 5.14 e resolvendo em função de A , foi possível determinar o valor da área de transferência de calor para os permutadores de calor dimensionados para cada um dos estudos realizados e calcular o comprimento do tubo (L). Esses valores encontram-se na Tabela 26.

No Anexo C estão apresentados os valores do calor transferido, das temperaturas das correntes e de ΔT_{lm} , para cada um dos estudos efetuados.

Tabela 26: Área de transferência de calor e comprimento do tubo para cada um dos estudos.

Estudo	$\dot{V}_{gc} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$L \text{ (m)}$
I	322,5	0,31	1,95
II	$\dot{V}_{ar} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$		
	186	0,24	1,5
	215	0,28	1,74
	240	0,31	1,94
	300	0,38	2,43
III	$\dot{V}_{gases} \text{ (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$		
	508,57	1,05	6,56
	537,57	1,14	7,13
	562,57	1,21	7,61
	622,57	1,4	8,76

7 Avaliação Económica

O principal objetivo de efetuar um balanço económico a um projeto, é verificar a viabilidade ou não da sua implementação.

De acordo com os cálculos apresentados no Capítulo 5, existe uma poupança no consumo de gás natural, após a introdução de um permutador de calor no processo e em consequência, a despesa associada ao consumo do gás natural, também reduzirá.

A Famaval adquire o gás natural à entidade distribuidora pelo valor aproximado de $0,54 \text{ €} \cdot \text{Nm}^3$. A partir deste valor é possível fazer um balanço entre a quantia despendida em gás natural no atual funcionamento do processo e o valor pago por este gás após a introdução do permutador de calor no processo.

Na Tabela 27 apresenta-se uma média diária, mensal e anual do custo associado ao consumo de gás natural na empresa, sem permutador de calor.

Tabela 27: Custo diário, mensal e anual do gás natural, sem permutador de calor.

	Custo (€)
<i>Diário</i>	86
<i>Mensal</i>	2141
<i>Anual</i>	24833

Foram calculadas as poupanças que se obteriam através da introdução de um permutador de calor no processo. Estes cálculos foram efetuados para os 3 diferentes estudos analisados neste projeto.

No Anexo B apresentam-se os valores de poupança obtidos após a aplicação de um permutador de calor no processo. Estes valores são apresentados para cada um dos estudos analisados neste projeto e durante alguns dias em que se efectuaram medições.

Na Tabela 28 apresentam-se as poupanças diárias, mensais e anuais possíveis de obter a partir de cada um dos estudos I, II e III. Para os estudos II e III, verifica-se que quanto maior o caudal que circula na conduta, maior é a poupança que se obtém no custo de gás natural.

Tabela 28: Poupanças diária, mensal e anual obtidas após introdução de permutadores de calor em cada um dos estudos.

		Poupança (€)		
Estudo	$\dot{v}_{gc} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$	Diária	Mensal	Anual
I	322,5	10	251	2916
II	$\dot{v}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$			
	186	5	121	1409
	215	6	138	1605
	240	6	158	1835
	300	13	316	3665
III	$\dot{v}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$			
	508,6	14	353	4095
	537,6	15	364	4226
	562,6	15	387	4488
	622,6	17	419	4862

O custo dos permutadores de calor foi calculado partindo dos dados inseridos nos Anexos C e D. Para efeitos de cálculos, aos valores de custo obtidos para os permutadores de calor adicionou-se 25%, que correspondem ao custo da bomba e tubagem necessárias à implementação deste projeto. Na Tabela 29 apresentam-se os custos atualizados dos permutadores de calor, obtidos para cada um dos três diferentes estudos, bem como o custo total do investimento.

Tabela 29: Custo dos permutadores de calor e custo de investimento.

Estudo	$\dot{v}_{gc} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$	$C_{\text{permutador}} \text{ (€)}$	$C_{\text{investimento}} \text{ (€)}$
I	322,5	3151	3939
II	$\dot{v}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$		
	186	3022	3777
	215	3093	3866
	240	3148	3934
	300	3262	4077
III	$\dot{v}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$		
	508,6	3825	4375
	537,6	3876	4416
	562,6	3917	4449
	622,6	4006	4523

Efetuada uma média do custo total de investimento e das poupanças anuais obtidas a partir de cada um dos estudos, foi possível determinar o período de retorno do investimento. O período de retorno do investimento corresponde ao tempo necessário para que o investidor recupere o capital investido no projeto. Neste caso, o estudo III é o que apresenta um período de recuperação mais baixo em relação aos outros estudos, sendo de um ano. Na Tabela 30 apresentam-se os valores obtidos.

Tabela 30: Período de retorno obtido para cada um dos estudos apresentados.

Estudo	Período de retorno (anos)
I	1,4
II	1,8
III	1

8 Conclusões

Dos três diferentes estudos efetuados concluiu-se que a melhor alternativa para que este projeto fosse bem sucedido seria implementar o estudo III, que visa recuperar o calor excedentário a partir dos gases de combustão de um queimador e do ar quente da conduta de exaustão da estufa, pois foi o que permitiu obter poupanças energéticas mais significativas. Assim sendo, no permutador de calor, iria circular o calor resultante dos gases de combustão do queimador G_1 e o ar quente proveniente da estufa em contracorrente com a água retirada do tanque de lavagem da zona de PD.

Dados fornecidos pela Famaval indicam um consumo de gás natural na secção de pintura nº 3 a rondar um total de 145600 m³N. Dos estudos realizados, o estudo III é o que permite obter melhores resultados ao nível da eficiência energética. Com a adição do permutador de calor, o consumo anual de gás natural seria de 37805 m³N, permitindo uma poupança em relação ao consumo atual de 8180 m³N.

A despesa atual em gás natural na secção de pintura nº3 é de cerca de 79000 € por ano e através do estudo III seria possível poupar anualmente cerca de 4420 € no consumo de gás natural. O investimento total deste projeto é de 4450 €, com um período de retorno de 1 ano, o que permite concluir que este será um projeto rentável para a empresa.

8.1 Objetivos Realizados

O trabalho desenvolvido teve como principal objetivo recuperar o calor excedente na Secção de Pintura nº3 para ser utilizado no aquecimento da água utilizada no processo de lavagem dos discos, diminuindo o consumo de gás natural na empresa.

Dos três diferentes estudos apresentados, concluiu-se que o Estudo III é o que permite obter maiores poupanças no consumo de gás natural, permitindo uma maior eficiência energética.

Desta forma, o objetivo do projeto foi cumprido.

8.2 Limitações e Trabalho Futuro

Alguma da informação necessária para o trabalho não estava completa nem atualizada e a aquisição de dados e criação de cenários tornaram-se tarefas mais complexas. No entanto, o estudo e trabalho foram efetuados dentro do tempo previsto e a implementação de um permutador de calor sugere-se apropriada, apresentando benefícios para a empresa.

Como trabalho futuro, propõe-se a determinação do caudal que sai da conduta do secador, para posterior junção ao caudal que sai do queimador G_1 e ao caudal de ar quente que sai da estufa. Desta forma, será possível obter resultados ainda mais proveitosos para a empresa, no que diz respeito à poupança no consumo de gás natural. A execução de um projeto semelhante noutras secções da empresa, nomeadamente, na secção de pintura nº1, de forma a reduzir o consumo de gás natural nesta zona também se apresenta como hipótese de um trabalho futuro.

9 Referências Bibliográficas

- [1] Coelho, P., Costa, M. Combustão. *Orion*, 2ª edição, 2008.
- [2] Energias Renováveis [Online] URL: <http://www.xn--energiasrenovveis-jpb.com/>, acedido em abril de 2014.
- [3] Guia da Eficiência Energética [Online] URL: file:///C:/Users/Utilizador/Downloads/guia_eficiencia_energetica.pdf, acedido em junho de 2014.
- [4] Famaval [Online] URL: <http://www.famaval.pt/pt/>, acedido em abril de 2014.
- [5] Famaval. Relatório Técnico-Auditoria Energética SGCIE, 2011.
- [6] Galp Energia [Online] URL: <http://www.galpennergia.com/PT/agalpennergia/os-nossos-negocios/Gas-Power/Gas-Natural/Aprovisionamento/Paginas/Aprovisionamento.aspx>, acedido em março de 2014.
- [7] Efinerg. Estratégia de Eficiência Energética em PME, 2012.
- [8] ANEME. Barómetro do Setor Metalúrgico e Eletromecânico, 2014.
- [9] Elahee, K. Heat recovery in the textile dyeing and finishing industry: lessons from developing economies. *Journal of Energy in Southern Africa*, Vol. 21 No.3, 2010.
- [10] Chapman and Hall. Waste-heat recovery from industrial furnaces. *Symposium*, 1ª edição, 1948.
- [11] Mahallawy, F., Saad, H. Fundamentals and Technology of Combustion. *Elsevier*, 2002.
- [12] Fimel, S.A. Descrição Técnica N°LR/LR/146F, 2008.
- [13] Campos, J. Apontamentos de Energia Térmica e Eficiência Energética, 2011.
- [14] Riello Burners. [Online] URL: http://www.serl.qc.ca/fiches/RS28M-38M-50M_manuel.pdf, acedido em março de 2014.
- [15] Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R., “Product & Process Design Principles“, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2004.

Anexo A Registo de medições

Queimadores


Ligou Desligou 

Tabela A.1: Dados registados no Túnel de Tratamento de Superfície para o queimador PD e queimador D (dia 10/03).

























Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador PD	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador D
10:44	0	48,1		10:44	0	39,1	
11:03	19	49,9		11:28	44	45,1	
12:28	104	44		12:52	128	42,6	
12:52	128	46,95		13:06	142	42,2	
13:06	142	48,6		13:19	155	41,9	
13:19	155	49,95		14:34	230	39,9	
14:34	230	45,2		15:08	264	39,15	
14:56	252	44,1		15:20	276	39,7	
15:20	276	46,9		15:38	294	42,8	
15:48	304	49,9		15:57	313	45,05	
16:06	322	49,45		16:06	322	45,45	
16:26	342	47,45		16:26	342	44,45	
16:41	357	46,15		16:41	357	43,7	
17:05	381	43,75		17:02	378	43,1	
17:10	386	43,1		17:14	390	42,65	
17:22	398	44,2		17:22	398	42,35	
17:27	403	44,95		17:27	403	42,2	
17:35	411	46,2		17:35	411	42	

Tabela A.2: Dados registados no Túnel de Polimerização para o queimador G₁ e queimador G₂ (dia 10/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G ₁	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G ₂
10:46	0	219,5		10:46	0	210	
12:51	125	219,9		10:53	7	215,2	
13:18	152	221,8		11:18	32	196,65	
14:35	229	222,5		11:38	52	214,95	
14:41	235	224,95		12:00	74	197,9	
14:50	244	206,95		12:21	95	214,95	
14:51	245	204,4		12:44	118	197,95	
14:52	246	201,2		12:51	125	204,7	
15:09	263	217,9		13:04	138	214,75	
15:21	275	218,95		14:35	229	214,1	
15:46	300	220,7		15:02	256	197,6	
16:05	319	221		15:21	275	214,6	

16:26	340	221,1		15:28	282	212,45	
16:40	354	220,15		15:46	300	197,65	○
17:02	376	219,5		16:05	319	215,4	○
17:13	387	218,8		16:26	340	199,9	
17:23	397	219,6		16:29	343	197,85	○
17:33	407	219,75		16:40	354	208,75	
				16:50	364	214,95	○
				17:02	376	205,65	
				17:13	387	197,55	○
				17:23	397	208,15	
				17:33	407	214,95	○

Tabela A.3: Dados registados no Túnel de Tratamento de Superfície para o queimador PD e queimador D (dia 11/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador PD	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador D
09:17	0	45,35	○	09:17	0	44	○
09:34	17	44,05	○	09:34	17	43,3	
09:53	36	45,65		09:53	36	42,7	
10:11	54	47,55		10:11	54	42,35	
10:25	68	48,6		10:25	68	42,1	
10:45	88	49,95	○	10:45	88	41,85	
11:03	106	48,7		11:03	106	41,7	
11:19	122	46,95		11:19	122	41,45	
11:34	137	45,65		11:34	137	41,25	
11:54	157	43,95	○	11:56	159	40,85	
12:12	175	45,75		12:12	175	40,7	
12:26	189	47,4		12:26	189	40,5	
12:57	220	49,85	○	12:57	220	40,55	
12:59	222	50		13:09	232	40,55	
13:09	232	49,4		14:23	306	40,1	
14:23*	306	45,4	○	14:46	329	40	
14:46	329	48,1		15:10	353	40,1	
15:10	353	50	○	15:30	373	40,15	
15:12	355	50,1		15:48	391	40,15	
15:22	365	49,4		16:18	421	39,95	
15:37	380	47,95		16:27	430	39,85	
15:52	395	46,45		16:46	449	39,9	
16:17	420	39,95	○	17:01	464	39,95	
16:21	424	43,95		17:29	492	40,15	
16:38	441	46					
16:56	459	47,8					
17:01	464	48,15					
17:29	492	50	○				

Tabela A.4: Dados registados no Túnel de Polimerização para o queimador G_1 e queimador G_2 (dia 11/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G_1	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G_2
09:19*	0	216,4	○	09:19*	0	209,85	○
09:27	8	217,05		09:27	8	214,95	⊘
09:39	20	217,75		09:39	20	206,65	
09:51	32	217,45		09:46	27	200,85	
10:06	47	218,85		09:51	32	196,65	○
10:21	62	219,15		10:06	47	213,65	
10:36	77	218,45		10:09	50	215,1	⊘
10:53	94	219,2		10:21	62	207,35	
11:10	111	220,65		10:33	74	196,7	○
11:27	128	220,1		10:49	90	213,65	
11:38	139	220,25		10:52	93	214,9	⊘
11:49	150	221,6		11:10	111	203,2	
11:58	159	221,1		11:19	120	196,85	○
12:10	171	220,05		11:29	130	209,05	
12:18	179	220,95		11:38	139	215,15	⊘
12:25	186	220,75		11:39	140	215,5	
12:43	204	220,45		11:49	150	208,25	
13:00	221	221		11:58	159	202,5	
13:08	229	221,35		12:05	166	196,95	○
14:21	302	225,5		12:06	167	196,6	
14:37	318	221,1		12:18	179	211,3	
14:49	330	222,45		12:24	185	214,95	⊘
15:02	343	222,95		12:25	186	215,3	
15:05	346	222,55		12:31	192	210,8	
15:16	357	222,7		12:43	204	200,5	
15:37	378	222,45		12:47	208	198,1	○
15:46	387	221,55		12:48	209	197	
15:59	400	221,45		13:00	221	210,4	
16:17	418	221,75		13:08	229	215,15	⊘
16:43	444	221,65		14:21*	242	201,8	○
17:05	466	221,35		14:37	318	215	⊘
17:25	486	221,1		14:49	330	206,85	
17:35	496	221,2		15:02	343	197,6	○
				15:04	345	197	
				15:16	357	211,5	
				15:22	363	214,95	⊘
				15:36	377	205,45	
				15:46	387	197,15	○
				15:48	389	196,75	
				15:59	400	211,3	
				16:05	406	215	⊘
				16:14	415	209,85	
				16:24	425	201,45	
				16:30	431	197,4	○

Tabela A.5: Dados registados no Túnel de Tratamento de Superfície para o queimador PD e queimador D (dia 12/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador PD	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador D
09:50	0	46,45	⊘	09:50	0	39,7	⊘
10:12	22	44,6		10:02	12	39,45	
10:17	27	44,1	⊙	10:07	17	39,35	
10:19	29	44		10:23	33	39,2	⊙
10:29	39	44,75		10:24	34	39,15	
10:52	62	47,6		10:38	48	40,2	
11:21	91	49,9	⊘	10:54	64	42,8	
11:23	93	50,1		11:10	80	45,05	⊘
11:38	108	48,3		11:33	103	45,15	
11:53	123	46,85		11:53	123	44,45	
12:12	142	45,15		12:12	142	43,75	
12:18	148	44,65		12:26	156	43,25	
12:24	154	44,25	⊙	14:24	274	41,05	
12:26	156	44,05		14:46	296	40,65	
14:24	274	44,8		15:09	319	40,45	
14:31	281	44,1	⊙	15:35	345	40,25	
14:53	303	46,35		15:50	360	40,25	
15:09	319	47,85		16:12	382	40,1	
15:14	324	48,3		16:34	404	39,8	
15:35	345	50	⊘	16:43	413	39,75	
15:40	350	49,95					
15:56	366	48,5					
16:12	382	47,05					
16:34	404	45,15					
16:43	413	44,6					

Tabela A.6: Dados registados no Túnel de Polimerização para o queimador G₁ e queimador G₂ (dia 12/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G ₁	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G ₂
09:51	0	216,55	⊙	09:51	0	204,8	⊘
10:10	19	216,4		09:59	8	197,9	⊙
10:21	30	216,9		10:00	9	197,3	
10:36	45	217,95		10:09	18	207,45	
10:52	61	217,6		10:20	29	214,6	⊘
11:05	74	218,45		10:21	30	214,7	
11:27	96	218,6		10:28	37	209,8	
11:47	116	219,2		10:42	51	198,05	⊙
12:05	134	219,35		10:44	53	196,95	
12:18	147	218,1		10:57	66	211,05	
12:31	160	218,7		11:03	72	214,85	⊘
14:26	275	220,3		11:12	81	209,85	

14:47	296	221,3		11:27	96	197,25	○
15:07	316	221,55		11:33	102	202,6	
15:22	331	224,05		11:47	116	214,95	⊘
15:24	333	225,1	⊘	11:48	117	215,15	
15:28	337	217,7		11:59	128	207,45	
15:31	340	211,4		12:10	139	198	○
15:32	341	206,65	○	12:12	141	196,7	
15:33	342	202,7		12:17	146	202,9	
15:36	345	202,95		12:31	160	215	⊘
15:50	359	218,2		12:32	161	215,15	
16:04	373	219,35		14:24	273	197,1	
16:11	380	220,3		14:27	276	200,9	
16:26	395	221,5		14:42	291	214,9	
16:41	410	221,25		14:42	291	215,15	⊘
				14:48	297	211,95	
				14:53	302	208,15	
				14:58	307	203,95	
				15:04	313	199,2	
				15:05	314	198,05	○
				15:07	316	196,85	
				15:15	324	206,8	
				15:21	330	211,9	
				15:25	334	215,2	⊘
				15:27	336	215,65	
				15:36	345	209,75	
				15:43	352	204	
				15:51	360	197,75	○
				15:52	361	196,65	
				15:57	366	202,7	
				16:04	373	210,1	

Tabela A.7: Dados registados no Túnel de Tratamento de Superfície para o queimador PD e queimador D (dia 13/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador PD	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador D
09:50	0	46,75	⊘	09:50	0	41,1	⊘
10:01	11	45,8		10:01	11	40,9	
10:12	22	44,7		10:20	30	40,55	
10:20	30	44,1	○	10:33	43	40,3	
10:22	32	44		10:47	57	40,15	
10:33	43	44,9		11:04	74	40	
10:47	57	46,8		11:31	101	39,9	
11:04	74	48,25		11:44	114	39,95	
11:18	88	49,1		12:03	133	39,95	
11:30	100	50	⊘	12:17	147	39,85	

11:35	105	50		12:36	166	39,7	
11:52	122	48,25		14:10*	260	39,65	⊘
12:17	147	45,85		14:23	273	39,2	⊙
12:36	166	44,05	⊙	14:30	280	40,55	
12:37	167	44		14:49	299	43,2	
14:10*	260	47,55	⊘	15:07	317	45,15	⊘
14:33	283	44,85		15:09	319	45,25	
14:42	292	44,15	⊙	15:12	322	45,65	
14:43	293	44,1		15:16	326	45,65	
14:58	308	45,45		15:31	341	45,25	
15:13	323	47,3		15:51	361	44,85	
15:33	343	49		16:11	381	44,35	
15:46	356	50		16:22	392	44	
15:48	358	50,15		16:33	403	43,85	
15:55	365	49,9		16:44	414	43,5	
16:11	381	48,15		16:48	418	43,35	
16:22	392	47,1					
16:33	403	46,15					
16:44	414	45,25					
16:48	418	44,75					

Tabela A.8: Dados registados no Túnel de Polimerização para o queimador G_1 e queimador G_2 (dia 13/03).

Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G_1	Hora	Tempo (min)	T (°C)	Queimador G_2
09:51*	0	216,3	⊙	09:51*	0	208	⊙
10:06	15	217,25		09:58	7	212,8	
10:24	33	216,95		10:02	11	215,05	⊘
10:44	53	218,25		10:03	12	214,8	
11:02	71	218,8		10:11	20	208,35	
11:20	89	218,95		10:24	33	197,95	⊙
11:33	102	220,15		10:25	34	196,65	
11:43	112	219,8		10:34	43	208,4	
12:00	129	220,55		10:44	53	214,95	⊘
12:16	145	219,7		10:49	58	213	
12:37	166	219,1		11:01	70	201,9	
14:11*	260	221,6	⊙	11:09	78	197,1	⊙
14:32	281	222,4		11:12	81	200	
14:49	298	221,55		11:20	89	210,25	
15:08	317	221,9		11:31	100	214,9	⊘
15:24	333	221,9		11:40	109	207,6	
15:39	348	220,7		11:48	117	200,2	
15:55	364	221,3		11:51	120	198,1	⊙
16:17	400	221,5		11:53	122	196,45	
16:31	400	221		11:58	127	201,3	
16:48	417	221,1		12:07	136	211,45	
				12:13	142	214,9	⊘

12:15	144	214,5	
12:23	152	210,1	
12:37	166	198,1	○
12:39	168	196,8	
14:11*	260	199,4	○
14:22	271	211,55	
14:26	275	214,9	⊘
14:28	277	214,4	
14:35	284	210,25	
14:49	298	198,2	○
14:51	300	196,75	
14:58	307	206,3	
15:10	319	214,85	⊘
15:11	320	215,15	
15:15	324	212,85	
15:33	342	198,2	○
15:35	344	196,65	
15:44	353	208,35	
15:54	363	214,8	⊘
15:55	364	215,2	
16:06	375	207,2	
16:17	386	198,1	○
16:19	388	197	
16:22	391	198,55	
16:28	397	208,2	
16:39	408	214,75	⊘

Níveis de água

Tabela A.9: Variações dos níveis de água (dia 10/03).

Hora	Tempo (min)	N_PD_PV (%)	N_D_PV (%)	N_L1_PV (%)	N_L2_PV (%)	N_DM_PV (%)
10:44	0	97,7	97,3	90,65	101,2	87,7
11:17	33	97,65	98,35	90,25	101,15	88,05
11:36	52	96	98,8	90,25	100,95	88,1
11:53	69	94,8	97,8	96,45	100,65	86,9
12:11	87	93,5	96,95	101,5	101,25	87,25
12:30	106	96,45	95,8	99,9	100,95	87,4
12:45	121	98,8	94,95	101,95	101,15	88,05
13:05	141	100,95	95,35	102,55	101,3	87,55
13:20	156	102,3	97,85	103,8	100,6	87,05
14:38	234	96,2	95,05	98,4	100,7	87,4
15:03	259	95,8	95,25	98,5	100,5	87,2
15:23	279	98,05	97,65	98,75	100,2	87,05
15:47	303	99,9	97,2	99,3	100,45	85,8
16:07	323	98,05	96,7	99,9	100,1	85,2
16:40	356	94,9	96,55	99,35	100,1	85,25

17:08	384	96	97,8	92,45	99,7	85,05
17:24	400	97,7	95	91,5	59,75	85,95
17:34	410	98,5	95,1	95,4	99,45	85,7

Tabela A.10: Variações dos níveis de água (dia 11/03).

Hora	Tempo (min)	N_PD_PV (%)	N_D_PV (%)	N_L1_PV (%)	N_L2_PV (%)	N_DM_PV (%)
09:21	0	97	98,45	91,25	93,6	85,9
09:41	20	97,2	99,9	91,35	93,5	85,45
10:00	39	98,7	98,7	91,2	94,05	85,25
10:16	55	100,55	99,25	91,1	93,9	85,6
10:36	75	101,8	98,35	91,15	93,8	85,3
10:55	94	101,75	98,7	90,9	93	85,5
11:15	114	100,6	96,95	90,8	92,7	85,25
11:32	131	100,05	99,05	91	93,05	85,6
11:51	150	99,2	96,4	90,75	93,15	85,7
12:11	170	101,15	96,7	90,85	92,55	85,3
12:37	196	100,95	98,85	90,7	92,6	86
12:53	212	100,1	97,95	90,75	92,75	85,7
13:09	228	99,25	98,4	90,75	92,55	85,25
14:25	304	98,7	97,4	90,3	105,8	85,5
14:45	324	97,85	96,45	90,25	105,3	85,35
15:11	350	97,4	95,9	90,15	105,2	84,9
15:31	370	96,7	97,75	90,15	102,95	84,45
15:50	389	96,4	97,1	89,9	102,3	86,05
16:06	405	96,7	96,75	89,65	102,55	85,6
16:20	419	96,05	99,4	89,65	102,95	85,25
16:34	433	96,55	99	88,25	102,7	84,9
16:51	450	95,95	98,5	89,65	102,5	86,1
17:12	471	95,8	96,65	89,55	102,65	85,55
17:34	493	94,95	97,6	89,4	102,35	85,85

Tabela A.11: Variações dos níveis de água (dia 12/03).

Hora	Tempo (min)	N_PD_PV (%)	N_D_PV (%)	N_L1_PV (%)	N_L2_PV (%)	N_DM_PV (%)
09:52	0	94,55	95,9	99,65	107	86
10:11	19	94	97,55	100,05	106,75	85,6
10:25	33	93,8	94,9	99,15	107,3	85,9
10:42	50	94,65	98,4	99,4	107,05	85,2
10:56	64	94,4	97,3	100,1	106,95	85,5
11:18	86	94,7	99,2	99,4	108,85	85,85
11:37	105	95,4	97,75	94,1	109,6	85,55
11:55	123	95,05	98,85	93,9	102,9	85,45
12:12	140	94,8	98,35	94	102,9	85,05
12:28	156	94,7	98,4	93,95	103,55	86
14:26	274	96,25	95,45	87,7	104,15	85,25
14:48	296	96,95	96,05	88,2	104,2	86,35

15:08	316	97,15	96,6	88,85	103,9	85,95
15:27	335	97,2	95,3	89,45	104,6	85,4
15:47	355	96,25	95,15	90	104,05	85
16:07	375	95,95	95,75	91,1	102,25	85,9
16:28	396	94,75	96,65	91,25	97,75	85,6
16:42	410	94,25	96,5	90,95	97,65	85,5

Tabela A.12: Variações dos níveis de água (dia 13/03).

Hora	Tempo (min)	N_PD_PV (%)	N_D_PV (%)	N_L1_PV (%)	N_L2_PV (%)	N_DM_PV (%)
09:53	0	97,2	96,9	89,95	101,85	87,85
10:10	17	96,7	95,75	90,3	101,85	86,95
10:26	33	96,85	95,2	90,2	102,3	87,6
10:45	52	97,3	95,45	90,6	102,2	87,5
11:03	70	97,65	96,4	90,55	102,8	87,3
11:18	85	97,35	97,05	90,5	103,35	86,85
11:35	102	96,95	95,95	90,75	102,7	86,9
11:53	120	95,65	96,65	90,65	103,25	86,8
12:11	138	95,05	96,45	90,2	102,95	86,5
14:13	260	96,3	96,9	83,85	103,65	85,3
14:31	278	95,85	97,25	90,75	104,15	84,8
14:51	298	97,15	98,4	91,05	103,45	84,5
15:14	321	97,3	97,8	90,7	103,75	86,35
15:34	341	97,5	98,8	90	103,55	85,9
15:56	363	96,3	97,75	91,4	103,1	85,55
16:13	380	95,65	97,4	91,2	103,2	85,35
16:30	397	94,8	97,7	91,25	102,95	85,1
16:45	412	94,25	97,7	91,2	102,75	84,85

Anexo B Balanço de energia ao tanque de pré-desengorduramento

Situação B.1 Balanço sem aproveitamento de calor da Secção de Pintura nº3

O balanço de energia, em regime transitório, aplicado ao tanque de pré-desengorduramento, traduz-se, com as seguintes considerações, através da Equação B.1:

- i) Volume de tanque constante, V_{tanque} ;
- ii) Caudal da bomba constante, $Q_{\text{bomba}T}$.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{bomba}T} \times (-\Delta T_2)}{V_{\text{tanque}}} + \frac{P_{\text{queimador}}}{V_{\text{tanque}} \times C_{p_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}}} \quad (\text{B.1})$$

Fazendo a aproximação seguinte:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_f - T_i}{dt} \quad (\text{B.2})$$

Aplicando a Equação B.2 à Equação B.1, obtém-se:

$$T_f = T_i + dt \left[\frac{P_{\text{queimador}}}{V_{\text{tanque}} \times C_{p_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}}} + \frac{Q_{\text{bomba}T} \times (-\Delta T_2)}{V_{\text{tanque}}} \right] \quad (\text{B.3})$$

Situação B.2 Balanço com aproveitamento de calor da Secção de Pintura nº3

O balanço de energia, em regime transitório, aplicado ao tanque de pré-desengorduramento, traduz-se, com as considerações indicadas na situação B.1, através da Equação B.4:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{bomba}T} \times (-\Delta T_2)}{V_{\text{tanque}}} + \frac{P_{\text{queimador}}}{V_{\text{tanque}} \times C_{p_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}}} + \frac{\dot{v}_a \times \Delta T_1}{V_{\text{tanque}}} \quad (\text{B.4})$$

Fazendo a aproximação apresentada na Equação B.2, obtém-se a Equação B.5:

$$T_f = T_i + dt \left[\frac{P_{\text{queimador}}}{V_{\text{tanque}} \times C_{p_{\text{água}}} \times \rho_{\text{água}}} + \frac{Q_{\text{bomba}T} \times (-\Delta T_2)}{V_{\text{tanque}}} + \frac{\dot{v}_a \times \Delta T_1}{V_{\text{tanque}}} \right] \quad (\text{B.5})$$

Considera-se T_i a temperatura inicial e T_f a temperatura final no tanque de pré-desengorduramento, num intervalo de tempo de um minuto.

Anexo C Valores obtidos a partir de cálculos

Tabela C.1: Quantidade de gases de combustão resultantes dos queimadores PD, G_1 e G_2 .

Componente	PD ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	G_1/G_2 ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)
CH_4	12,22	8,48
CO_2	33,61	23,31
H_2O	27,50	19,07
O_2	4,89	3,39
N_2	227,48	157,77
TOTAL	293,48	203,54

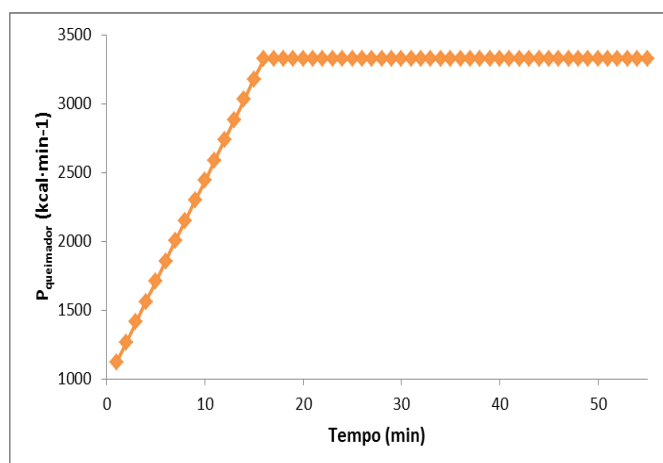


Figura C.1: Funcionamento de um queimador: variação da potência ao longo do tempo.

Tabela C.2: Consumo de gás natural no queimador PD, fora do horário de medições.

Dia	Tempo (min)	Consumo (m^3N)
10	366,3	92
11	487,7	122,4
12	450,3	113,1
13	464,3	116,6

Tabela C.3: Capacidade calorífica específica dos gases de combustão e do ar.

	C_p (kcal·kg ⁻¹ °C ⁻¹)
Gases de combustão	0,24
Ar	0,237

Tabela C.4: Tempo atual de funcionamento do queimador PD e consumo atual de gás natural para alguns dias de medições.

Dia	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
10	52	13,05
	53	13,31
	52	13,05
11	72	18,07
	64	16,07
	73	18,33
12	65	16,32
	65	16,32
	63	15,82

Estudo I

Tabela C.5: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural, após a introdução de um permutador de calor no processo (Estudo I).

Dia	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
10	47	11,8
	48	12,05
	47	11,8
11	63	15,82
	57	14,31
	63	15,82
12	57	14,31
	57	14,31
	56	14,06

Tabela C.6: Poupança obtida no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural, para alguns dias de medições.

Dia	Tempo (min)	Consumo (m³N)
10	5	1,26
	5	1,26
	5	1,26
11	9	2,26
	7	1,76
	10	2,51
12	8	2,01
	8	2,01
	7	1,76

Tabela C.7: Custo de gás natural para alguns dias de medições.

Dia	Tempo (min)	Custo (€)
10	47	6,4
	48	6,5
	47	6,4
11	63	8,5
	57	7,7
	63	8,5
12	57	7,7
	57	7,7
	56	7,6
13	62	8,4
	55	7,5
	57	7,7

Estudo II

Tabela C.8: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural, após a introdução de um permutador de calor no processo para alguns dias de medições (Estudo II).

Dia	$\dot{V}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$							
	186		215		240		300	
	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
10	50	12,6	49	12,3	49	12,3	48	9,6
	51	12,8	50	12,6	50	12,6	49	9,8
	50	12,6	49	12,3	49	12,3	48	9,6
11	67	16,8	67	16,8	66	16,6	65	12,8
	60	15,1	60	15,1	59	14,8	58	11,6
	68	17,1	68	17,1	67	16,8	66	13
12	61	15,3	61	15,3	60	15,1	59	11,8
	61	15,3	61	15,3	60	15,1	59	11,8
	60	15,1	59	14,8	59	14,8	57	11,4

Tabela C.9: Poupança no tempo que o queimador PD e consumo de gás natural após adição de permutadores de calor para alguns dias de medições (estudo II).

Dia	$\dot{V}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$							
	186		215		240		300	
	Poupança							
	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)	Tempo (min)	Consumo (m³N)
10	2	0,5	3	0,8	3	0,8	4	3,5
	2	0,5	3	0,8	3	0,8	4	3,5
	2	0,5	3	0,8	3	0,8	4	3,5
11	5	1,3	5	1,3	6	1,5	7	5,2
	4	1	4	1	5	1,3	6	4,5
	5	1,3	5	1,3	6	1,5	7	5,3
12	4	1	4	1	5	1,3	6	4,5
	4	1	4	1	5	1,3	6	4,5

	3	0,8	4	1	4	1	6	4,4
--	---	-----	---	---	---	---	---	-----

Tabela C.10: Custo do gás natural para alguns dias de medições.

Dia	Quantidade de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)							
	186		215		240		300	
	Tempo (min)	Custo (€)	Tempo (min)	Custo (€)	Tempo (min)	Custo (€)	Tempo (min)	Custo (€)
10	50	6,8	49	6,6	49	6,6	48	5,2
	51	6,9	50	6,8	50	6,8	49	5,3
	50	6,8	49	6,6	49	6,6	48	5,2
11	67	9,1	67	9,1	66	9	65	6,9
	60	8,1	60	8,1	59	8	58	6,3
	68	9,2	68	9,2	67	9,1	66	7
12	61	8,3	61	8,3	60	8,1	59	6,4
	61	8,3	61	8,3	60	8,1	59	6,4
	60	8,1	59	8	59	8	57	6,2
13	67	9,08	66	8,95	65	8,81	64	6,82
	59	8,0	58	7,86	58	7,86	57	6,05
	61	8,27	61	8,27	60	8,13	59	6,38

Estudo III

Tabela C.11: Capacidade calorífica específica da mistura considerada no estudo III.

$\dot{v}_{mistura}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	508,57	537,57	562,57	622,57
$C_{p,mistura}$ ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	0,6917	0,6935	0,6942	0,6951

Tabela C.12: Tempo de funcionamento do queimador PD e consumo de gás natural, após a introdução de um permutador de calor no processo para alguns dias de medições (Estudo II).

Dia	$\dot{v}_{mistura}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)							
	508,6		537,6		562,6		622,6	
	Tempo (min)	Consumo (m^3N)	Tempo (min)	Consumo (m^3N)	Tempo (min)	Consumo (m^3N)	Tempo (min)	Consumo (m^3N)
10	45	11,3	45	11,3	44	11,1	44	11,3

	46	11,6	45	11,3	45	11,3	44	11,1
	45	11,3	45	11,3	44	11,1	44	11,3
11	59	14,8	58	14,6	58	14,6	56	14,1
	53	13,3	53	13,3	53	13,3	51	12,8
	60	15,1	59	14,8	58	14,6	57	14,3
12	54	13,6	54	13,6	53	13,3	52	13,1
	54	13,6	54	13,6	53	13,3	52	13,1
	53	13,3	52	13,1	52	13,1	51	12,8

Tabela C.13: Poupança obtida no tempo que o queimador PD está ligado e no consumo de gás natural, para alguns dias de medições.

Dia	$\dot{V}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$							
	508,6		537,6		562,6		622,6	
	Poupança							
	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)	Tempo (min)	Consumo (m ³ N)
10	7	1,8	7	1,8	8	2	8	1,8
	7	1,8	8	2	8	2	9	2,3
	7	1,8	7	1,8	8	2	8	1,8
11	13	3,3	14	3,5	14	3,5	16	4
	11	2,8	11	2,8	11	2,8	13	3,3
	13	3,3	14	3,5	15	3,8	16	4
12	11	2,8	11	2,8	12	3	13	3,3
	11	2,8	11	2,8	12	3	13	3,3
	10	2,5	11	2,8	11	2,8	12	3

Tabela C.14: Custo do gás natural para alguns dias de medições.

Dia	Quantidade de ar (m ³ ·h ⁻¹)							
	508,6		537,6		562,6		622,6	
	Tempo (min)	Custo (€)	Tempo (min)	Custo (€)	Tempo (min)	Custo (€)	Tempo (min)	Custo (€)
10	45	6,1	45	6,1	44	6	44	11,3
	46	6,2	45	6,1	45	6,1	44	11,1

	45	6,1	45	6,1	44	6	44	11,3
11	59	8	58	7,9	58	7,9	56	14,1
	53	7,2	53	7,2	53	7,2	51	12,8
	60	8,1	59	8	58	7,9	57	14,3
12	54	7,3	54	7,3	53	7,2	52	13,1
	54	7,3	54	7,3	53	7,2	52	13,1
	53	7,2	52	7,1	52	7,1	51	12,8
13	58	7,9	58	7,9	57	7,7	56	14,1
	52	7,1	52	7,1	51	6,9	50	12,6
	54	7,3	54	7,3	53	7,2	52	13,1

Permutadores de calor

Tabela C.15: Temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria para cada um dos estudos.

	Estudo I	Estudo II	Estudo III
$T_{h,in}$ (°C)	256,2	178,9	217,6
$T_{h,out}$ (°C)	106,2	78,9	87,6
$T_{c,in}$ (°C)	44		
$T_{c,out}$ (°C)	50		

Tabela C.16: Calor transferido no permutador de calor e média logarítmica das temperaturas para cada estudo.

Estudo	$\dot{V}_{gc} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$	Q (W)	$\Delta T_{lm} \text{ (}^\circ\text{C)}$
I	322,5	8508	120,2
II	$\dot{V}_{ar} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$		
	186	3939	72,2
	215	4554	
	240	5083	
	300	6354	
III	$\dot{V}_{mistura} \text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1}\text{)}$		
	508,6	12585	92,1
	537,6	13337	
	562,6	13971	
	622,6	15481	

Anexo D Custos de Equipamento [15]

O custo de um permutador ($C_{\text{permutador}}$) é obtido a partir da expressão:

$$C_{\text{permutador}} = F_p \times F_M \times C_B \quad \text{D.1}$$

Onde:

F_p é um fator de pressão, em psig, o qual é calculado para uma gama de P compreendida entre 600 e 3000 psig e é dado por:

$$F_p = 0,8510 + 0,1292 \times \left(\frac{P}{600} \right) + 0,0198 \times \left(\frac{P}{600} \right)^2 \quad \text{D.2}$$

F_M é um fator de material e para este projeto considerou-se o seu valor de 2. O tubo externo é constituído em aço carbono e o tubo interno em aço inoxidável.

Para um permutador de calor de duplo tubo, o custo base (C_B) é dado por:

$$C_B = \exp[7,1248 + 0,16 \times \ln(A)] \quad \text{D.3}$$

Anexo E Análise Económica [15]

A atualização do custo do equipamento a implementar foi efetuada utilizando os dados retirados da revista *Chemical Engineering*, Vol. 121 Número 5, Maio 2014 e que estão apresentados na Figura E.1.

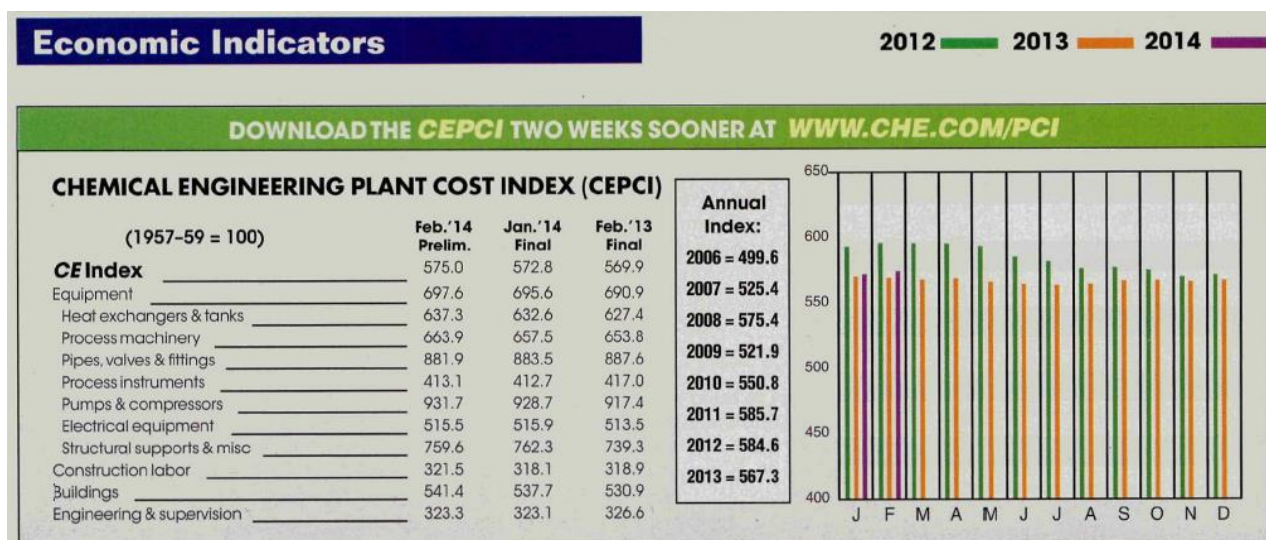


Figura E.1: Índice de atualização de preços.

Com os dados da figura anterior e recorrendo à Equação 4, é possível calcular os custos atuais.

$$Custo = Custo_{base} \left(\frac{I}{I_{base}} \right) \quad E.1$$

Onde:

I – índice de custos de referência